



Desenvolvimento de rotinas de sensoriamento indireto para automação de ciclo de lavadoras de roupas

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Fernando Elias de Oliveira

Florianópolis, fevereiro de 2013

Desenvolvimento de rotinas de sensoriamento indireto para automação de ciclo de lavadoras de roupas

Fernando Elias de Oliveira

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Ubirajara Franco Moreno

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Ubirajara Franco Moreno
Orientador no Curso

Maurilio Fabio Rodrigues Catharino
Orientador na Empresa

Agradecimentos

Aos meus pais, Francisco e Nadir, pelo amor, pela educação e pelo apoio incondicional que recebi durante a minha vida. Aos meus irmãos, Elison e Grazielle, pelo suporte e apoio fornecido sempre que precisei. Ao meu irmão, também, por junto com sua esposa Dayane, nos presentear com um anjo que se chama Heitor.

À minha namorada, Gabriela, sempre presente nos melhores e piores momentos desta caminhada. Seu amor, conselhos e suas palavras carinhosas serviram de motivação durante todos estes anos.

Ao meu gestor, Maurilio Catharino, pela oportunidade neste projeto e por todo o aprendizado que tive durante este período. Aos meus colegas de trabalho, que estavam sempre dispostos a ajudar quando precisei.

À todos os professores do DAS, pelas sábias palavras e pelos desafios propostos, que contribuíram diretamente para meu desenvolvimento profissional. Em especial ao professor Ubirajara, meu orientador durante o estágio obrigatório e também durante meu Projeto de Fim de Curso.

Aos meus amigos, pelos momentos de lazer e também por todo o apoio que tive quando precisei.

Resumo

Atualmente, o mercado de eletrodomésticos está cada vez mais competitivo, e os produtos lançados são cada vez mais inovadores. É obrigação de toda a empresa que luta por uma fatia do mercado estar em um constante processo de inovação, caso contrário, tenderá a falência.

A Whirlpool Corporation, maior fabricante de eletrodomésticos de linha branca do mundo, está presente neste contexto, desenvolvendo diversos produtos, como refrigeradores, lavadoras e secadoras de roupas, micro-ondas, entre outros.

Com o avanço da tecnologia, a área computacional é a que mais vem se desenvolvendo no ramo de eletrodomésticos, possibilitando o acréscimo de novas funcionalidades muitas vezes sem precisar incluir novos componentes no sistema.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver algoritmos e melhorias na área de sensoriamento das máquinas de lavar do mercado norte-americano, com destaque para os algoritmos de estimação de massa, detecção de tipo de tecido e detecção de desbalanceamento, sem a necessidade de incluir sensores dedicados para estas tarefas.

Para tanto, serão apresentadas as teorias existentes em cada algoritmo, análises feitas, testes executados e as soluções propostas para cada um dos algoritmos.

Abstract

Nowadays, the appliances sector is increasingly competitive, and its products are more and more innovative. Every company that wants to have its market share must be in a constant innovation process, otherwise, it may bankrupt.

The Whirlpool Corporation, largest world's manufacturer of white goods appliances, is present in this context, developing a large range of products, such as refrigerators, washers, dryers, microwaves, and so on.

With the advancement of technology, the computational area is one of the most benefited area, enabling new features on the products without the need of adding new components.

This report aims to develop algorithms and improvements on the sensing tasks of North-American washers, especially load mass estimation, fabric type detection and unbalance detection, without the need to include sensors to do these tasks.

To do so, there will be presented theories of each algorithm, analysis, tests performed and the solutions proposed for each one of these algorithms.

Sumário:

Agradecimentos	4
Resumo	5
Abstract	6
Sumário:	7
Capítulo 1: Introdução.....	9
1.1: Objetivo do trabalho	9
1.2: Estrutura do trabalho.....	10
Capítulo 2: : A empresa e o projeto.....	12
2.1: A empresa	12
2.2: Problemas abordados no trabalho.....	13
2.2.1: Algoritmo de estimação de carga (<i>Load Sensing</i>).....	15
2.2.2: Algoritmo de detecção de tipo de tecido (<i>Fabric Type Detection</i>).....	15
2.2.3: Algoritmo de detecção de desbalanceamento	16
Capítulo 3: O Algoritmo de estimação de carga	17
3.1: Algoritmos já existentes no mercado	17
3.1.1: Estimação de massa utilizando um sensor de posição.....	18
3.1.2: Estimação de massa utilizando uma célula de carga	19
3.1.3: Estimação de inércia por meio de rotação de um <i>impeller</i>	19
3.2: Algoritmos utilizados pela Whirlpool	20
3.2.1: Estimação de carga por meio da inércia	20
Capítulo 4: Desenvolvimento e implementação	25
4.1: Metodologia Seis Sigma	25
4.1.1: Cartas de controle	27
4.1.2: Mapa de Processo	27
4.1.3: Mapa de Raciocínio.....	28
4.1.4: DOE	29
4.2: Plataforma 1	29
4.2.1: Situação atual do algoritmo.....	30

4.2.2: Testes de validação – Variação de máquina para máquina	32
4.2.3: Testes de validação – Variação de motor para motor	39
4.2.4: Testes de validação – Variação de placa para placa.....	40
4.2.5: Soluções propostas	41
4.2.6: Resultados obtidos	41
4.3: Plataforma 2	43
4.3.1: Situação atual do algoritmo	43
4.3.2: Análise de influência de variáveis no algoritmo	43
4.3.3: O problema da disposição da carga no cesto	47
4.3.4: Implementação em software embarcado	49
4.3.5: Validação da solução	50
4.3.6: Próximos passos	51
4.3.7: Resultados obtidos	52
Capítulo 5: Algoritmo de detecção de tipo de carga e algoritmo de detecção de desbalanceamento	54
5.1: Algoritmo de detecção de tipo de carga	54
5.1.1: Desafio proposto	54
5.1.2: Resultados obtidos	56
5.2: Algoritmo de detecção de desbalanceamento	57
5.2.1: Desafio proposto	57
5.2.2: Resultados obtidos	59
Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas	63
Bibliografia:	65

Capítulo 1: Introdução

Atualmente, o mercado consumidor de eletrodomésticos está cada vez mais exigente, obrigando as empresas a buscarem soluções práticas, inovadoras e eficientes, sem um considerável aumento no custo dos produtos. É dever de toda empresa, que busca a liderança de mercado, inovar seus produtos constantemente, de modo a oferecer soluções diferenciadas a seu público alvo, convencendo-os de que sua criação merece estar em suas casas. Entre essas inovações, destacam-se ideias que visam facilitar o uso do produto, seja tornando-os mais rápidos, eficientes, bonitos ou revolucionários.

Existe uma grande preocupação atualmente com a redução do consumo de energia, muitas vezes considerado um critério ganhador de pedidos. No mercado norte-americano, existem outros critérios ganhadores de pedidos que não são tão comuns no Brasil, tais como órgãos reguladores que definem métricas de limpeza, eficiência, consumo de materiais, etc., permitindo que o consumidor possa facilmente comparar vários produtos em diferentes fatores, o que auxilia na escolha final, pois é possível identificar os pontos fortes e fracos de cada produto.

É neste contexto de grande disputa pela maior fatia do mercado consumidor que se insere a Whirlpool Corporation, maior indústria de eletrodomésticos de linha branca do mundo, atuando nos setores de refrigeração, lavanderia, cocção, entre outros. Seus produtos estão presentes em mais de 70 países. No Brasil, destaca-se pelas marcas Brastemp, Consul e Kitchen Aid.

1.1: Objetivo do trabalho

Este trabalho tem por foco a área de lavanderia voltada à produtos para o mercado norte-americano, um dos mercados mais exigentes do mundo, devido à seus inúmeros órgãos em prol do consumidor que visam fiscalizar o produto de variadas maneiras.

A principal atividade a ser desenvolvida neste trabalho será a implementação de um algoritmo de estimação de carga (*Load Sensing*), que possibilita, de forma automática, que o sistema/controle eletrônico estime a quantidade de roupa que está

dentro da máquina, tornando possível a determinação de alguns parâmetros do ciclo de lavagem sem necessidade do usuário especificá-los na interface. O algoritmo será desenvolvido e testado em duas plataformas diferentes, a primeira, mais antiga e já presente no mercado, e a segunda, ainda em fase de desenvolvimento.

Durante o desenvolvimento do algoritmo, espera-se passar por cada uma das seguintes etapas, de modo a garantir que o objetivo geral do trabalho seja alcançado:

- Estudo das tecnologias já existentes e propostas da área de engenharia para o algoritmo;
- Análise dos principais fatores que influenciam o funcionamento do algoritmo;
- Design do algoritmo, em termos de comandos a serem efetuados na lavadora;
- Testes realizados na máquina com posterior processamento off-line para validação;
- Implementação do algoritmo em plataforma embarcada;
- Validação do algoritmo implementado.

Este trabalho também contemplará o suporte a outros dois algoritmos nas plataformas utilizadas que estão diretamente ligados ao algoritmo de estimação de carga: detecção de desbalanceamento e detecção de tipo de tecido.

1.2: Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado de forma a, primeiramente, contextualizar o leitor sobre o assunto, fazendo-o compreender sua necessidade no produto, seguido pelo efetivo desenvolvimento e resultados obtidos. Para isso, o trabalho contará com cinco capítulos, que explicarão desde alguns detalhes importantes da empresa, embasamento teórico do algoritmo até sua implementação.

O primeiro capítulo é uma breve introdução sobre o assunto, bem como o contexto onde este trabalho se insere, seguido pela apresentação de sua estrutura.

O segundo capítulo tem como objetivo principal apresentar a motivação deste trabalho. Será feita uma descrição da empresa, e suas áreas-chave para

desenvolvimento de produto. Em seguida, uma breve descrição de cada algoritmo, detalhando suas respectivas necessidades e aplicações.

O terceiro capítulo abordará um estudo teórico sobre o algoritmo de estimação de carga, explicando seus princípios físicos, soluções já existentes, e algumas soluções propostas, seus benefícios e problemas. Em seguida serão apresentados e detalhados os algoritmos que serão utilizados e testados/implementados em cada uma das plataformas já citadas.

O quarto capítulo tem como objetivo mostrar a fase de implementação do algoritmo de estimação de carga, detalhando análises feitas, testes executados e propostas desenvolvidas.

O quinto capítulo é dedicado às atividades feitas para os algoritmos de detecção de desbalanceamento e detecção de tipo de tecido. Serão apresentados os desafios propostos, testes e análises executadas, e soluções propostas.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos nos algoritmos desenvolvidos no terceiro e quarto capítulo, visando mostrar se cada implementação foi bem sucedida ou não.

O sétimo e último capítulo apresenta as conclusões finais do trabalho, bem como perspectivas de trabalhos futuros que surgiram ao longo deste trabalho desenvolvido.

Capítulo 2: : **A empresa e o projeto**

O presente capítulo tem por objetivo apresentar a empresa Whirlpool Latin America, bem como apresentar os algoritmos que serão desenvolvidos neste trabalho, sua motivação e quais seus resultados esperados.

2.1: A empresa

A Whirlpool Corporation é a maior indústria de eletrodomésticos de linha branca do mundo, contando com cerca de 67 mil colaboradores atuando em mais de 70 centros de produção e tecnologia. É conhecida por várias marcas ao redor do mundo, com destaque para as marcas Whirlpool, Maytag, Kitchen Aid, Bauknecht, Brastemp e Consul.

A Whirlpool Latin America conta com três unidades fabris(Joinville, Rio Claro e Manaus), quatro centros de tecnologia(Refrigeração, Cocção e Condicionadores de Ar em Joinville e Lavanderia em Rio Claro), dois centros de distribuição(São Paulo e Pernambuco) e um centro administrativo(São Paulo). Além disso, conta com um centro de distribuição na Argentina e escritórios em sete países da América Latina.

Em 2010, lançou cerca de 200 modelos de produtos no mercado, e depositou o pedido de 68 patentes. Estes são indicadores que mostram o espírito de inovação da empresa, buscando sempre produtos com funções exclusivas, de modo a conquistar o consumidor. A tarefa de criar novos produtos é função do grupo de pesquisa e desenvolvimento de cada um dos centros de tecnologia. Dos 14500 colaboradores que trabalham no Brasil, 700 são dedicados exclusivamente à pesquisa e desenvolvimento de produtos. Diferente de muitas empresas, grande maioria dos produtos produzidos para o mercado nacional são desenvolvidos no próprio país. [11]

Embora o centro de tecnologia de lavanderia localize-se em Rio Claro, também existe um pequeno centro de pesquisa e desenvolvimento em Joinville na área de *Cross Product*, que abriga, entre outros, vários projetos em lavanderia, trabalhando exclusivamente com os Estados Unidos para o desenvolvimento de

produtos para o mercado norte-americano. Este centro é subdividido em *Motors Strategy*, realizando pesquisas para análise de viabilidade dos motores e também desenvolvimento de novas tecnologias na área de motores, *Motor Control*, responsável pelos algoritmos de controle de motor implementado no software embarcado das máquinas, e *Control & Electronics*, responsável por pesquisas na área de novos algoritmos, sensoriamento, instrumentação e controle de sistemas.

O estágio descrito neste relatório foi feito na área de *Control & Electronics*, focado no desenvolvimento e testes com algoritmos relacionados à lavadoras de eixo vertical (*top load*).

2.2: Problemas abordados no trabalho

É natural que ocorra uma grande disputa entre os fabricantes no mercado de eletrodomésticos, bens presentes na casa da maioria da população em todo o mundo. No mercado americano não é muito diferente: sendo um país caracterizado por sua forte economia e altos índices de consumo, a tendência é que o consumidor renove seus eletrodomésticos em média a cada 10 anos. [1]

Além disso, o país possui vários órgãos regulamentadores e grupos responsáveis por oferecer diferentes avaliações dos produtos de cada área, com índices relativos ao seu desempenho, consumo de energia, água (quando necessário), níveis de ruído, etc. Um exemplo é a União dos Consumidores (*CU – Consumer Union*), que fornece *benchmarks* entre vários produtos de uma determinada categoria. São resultados muito bons tanto para os consumidores, que têm à sua disposição uma grande ferramenta de comparação, quanto para as empresas, que podem enxergar possíveis áreas de melhorias em seus produtos. A Figura 1 retrata este cenário, onde é possível observar a comparação das melhores máquinas de eixo vertical do mercado em vários aspectos, como performance de lavagem, eficiência energética, nível de ruído, tempo de ciclo, etc. Este conjunto de variáveis é traduzido em uma nota para cada máquina, que serve para ordená-las em um ranking.

Brand & Model		Price	Ratings and Test Results									
			Overall score	Washing performance	Energy efficiency	Water efficiency	Capacity	Gentleness	Noise	Vibration	Cycle time (min.)	
		Approximate retail price	0 P F G VG E 100									
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Fabricante 1	\$700 Price & Shop ▶	80	+	+	+	+	○	+	+	65	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Fabricante 2	\$950 Price & Shop ▶	79	+	+	+	+	+	+	+	65	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Whirlpool Maytag	\$850 Price & Shop ▶	79	+	+	+	+	+	○	+	65	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Fabricante 3	\$1100 Price & Shop ▶	78	+	+	+	+	+	○	+	70	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Whirlpool Maytag	\$1000 Price & Shop ▶	76	+	+	+	+	+	○	+	70	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Whirlpool Vantage	\$1700 Price & Shop ▶	75	+	+	+	+	○	+	+	80	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Fabricante 4	\$800 Price & Shop ▶	74	+	+	+	+	○	○	+	45	

Figura 1 - Tabela de comparação de máquinas de eixo vertical retirada de [3]

Baseado nesta tabela é possível perceber que as melhores máquinas encontram-se em um patamar semelhante no que diz respeito ao seu desempenho geral, visto que a diferença do primeiro para o quarto colocado é de 2 pontos de 80.

Com isso, toda otimização ou melhoria feita em um produto pode ser transformada em aumento no desempenho em um dos critérios de avaliação, podendo levar a um aumento no desempenho geral. Muitas vezes, o aumento de um ponto é fundamental para um produto ser considerado o melhor da categoria.

Este tipo de informação traz credibilidade à empresa, que é reconhecida pelo seu grande trabalho no desenvolvimento de uma plataforma, bem como dá confiança ao consumidor para saber que sua escolha para certo produto é a escolha certa.

É justamente neste contexto que se encaixa este trabalho, que visa o desenvolvimento e teste de algoritmos que melhorem o desempenho das lavadoras de roupa, trazendo benefícios que podem ser diferenciais na corrida para apresentar o melhor produto ao consumidor. Este trabalho envolverá 3 algoritmos: Estimação de carga, Estimação de tipo de tecido e Detecção de desbalanceamento, onde dar-se-á maior atenção ao primeiro deles.

2.2.1: Algoritmo de estimação de carga (*Load Sensing*)

Este algoritmo tem como objetivo estimar a massa da carga que o consumidor deseja lavar. Uma vez estimado, a máquina poderá ajustar de forma inteligente o tempo de duração do ciclo, consumo de água, etc.

Um fato interessante desse algoritmo é a ausência de sensoriamento direto. Sua proposta é acrescentar mais uma *feature* na máquina sem que esta tenha seu custo aumentado devido à novos sensores, utilizando apenas variáveis estimadas pelo observador implementado no algoritmo de controle de motores.

Em um primeiro momento será feita a avaliação o algoritmo de estimação de carga para uma plataforma que já se encontra no mercado, onde o mesmo algoritmo fará parte da nova geração do produto.

Em seguida, será apresentado o desenvolvimento do algoritmo para uma plataforma totalmente nova, em fase de desenvolvimento (protótipo), que abordará desde estudos iniciais, equacionamento matemático, análise de variáveis críticas do sistema, até sua implementação em software embarcado e validação dos dados.

2.2.2: Algoritmo de detecção de tipo de tecido (*Fabric Type Detection*)

O objetivo deste algoritmo é detectar automaticamente o tipo de carga que o consumidor inseriu na máquina (toalhas, lençóis, etc.). Assim como o algoritmo de estimação de carga, este serve para o sistema inferir em variáveis do seu ciclo de lavagem. Outra semelhança é que a implementação deste algoritmo não depende de novos sensores, uma vez que extrai informações de sensores já existentes no produto atual.

Um fator importante a ser lembrado sobre esse algoritmo é que ele trabalha em “parceria” com o algoritmo anterior, onde a massa estimada torna-se uma variável de entrada para o algoritmo de detecção de tipo de tecido.

O trabalho realizado neste algoritmo foi uma análise de robustez no sensor de pressão, que determina a quantidade de água que está abaixo do cesto. Este trabalho foi focado na plataforma antiga, sendo este algoritmo parte das atualizações da nova geração do produto.

2.2.3: Algoritmo de detecção de desbalanceamento

O desbalanceamento de carga em uma máquina é considerado um fator crítico na hora da centrifugação. Cargas desbalanceadas podem levar o sistema à instabilidade, causando prejuízos tanto ao consumidor quanto à imagem da empresa.

Para este algoritmo, foram feitas algumas análises e comparações, visando entender qual algoritmo (e sua configuração) é o mais robusto para detecção de desbalanceamento.

O Capítulo 3 focará exclusivamente no embasamento teórico do algoritmo de estimação de carga, que foi o assunto trabalhado durante cerca de 80% do tempo durante o período que contempla este estágio.

Capítulo 3: O Algoritmo de estimação de carga

O presente capítulo tem por finalidade esclarecer a teoria do algoritmo de estimação de carga (*Load Sensing*), seu objetivo, técnicas já existentes e os métodos utilizados na Whirlpool para garantir que o sistema seja capaz de identificar com certa precisão a quantidade de carga que foi “inserida”.

Considera-se um algoritmo de estimação de carga qualquer lógica, que utilize ou não sensores, onde seu resultado é uma inferência sobre a massa, neste caso, que foi depositada no interior da máquina de lavar.

Como já explicado anteriormente, este algoritmo não é considerado indispensável à máquina, porém, pode ser um diferencial, levando o produto final a superar as expectativas, transformando o algoritmo em um critério ganhador de pedidos, isto é, em um diferencial que chame a atenção e faça com que o cliente decida por um determinado produto. Além de gerar uma redução de gastos para o cliente e contribuir para o meio ambiente, pois uma vez que bem implementado, pode reduzir o tempo de ciclo de lavagem, e diminuir consideravelmente o consumo de água, insumos e energia.

3.1: Algoritmos já existentes no mercado

Atualmente, muitas marcas no mercado americano já possuem ferramentas que possibilitam a inferência da massa inserida no cesto, principalmente em seus produtos voltados às classes média-alta e alta. No Brasil não é muito diferente, onde a maioria dos produtos considerados top de linha também já possuem esta tecnologia.

A seguir, serão apresentadas algumas técnicas já utilizadas para estimação de carga no mercado de lavanderia, sendo algumas delas existentes e já implementadas e outras teorias de possíveis soluções. Por fim, este capítulo apresentará o conceito utilizado pela Whirlpool para estimar a massa da carga, e a proposta de utilização do algoritmo em duas diferentes plataformas.

3.1.1: Estimação de massa utilizando um sensor de posição

Esta solução pode se aplicar tanto à máquinas de eixo horizontal (carregamento frontal) quanto máquinas de eixo vertical (carregamento superior). Consiste em acoplar um sensor de posição aos amortecedores/molas do cesto, fazendo com que este se desloque devido à variação de carga no interior da máquina. A Figura 2 mostra um esquema de uma máquina de eixo horizontal com estimação de carga por um sensor de posição. Sua precisão é satisfatória, porém exige um aumento no custo do produto, devido à adição de sensores.

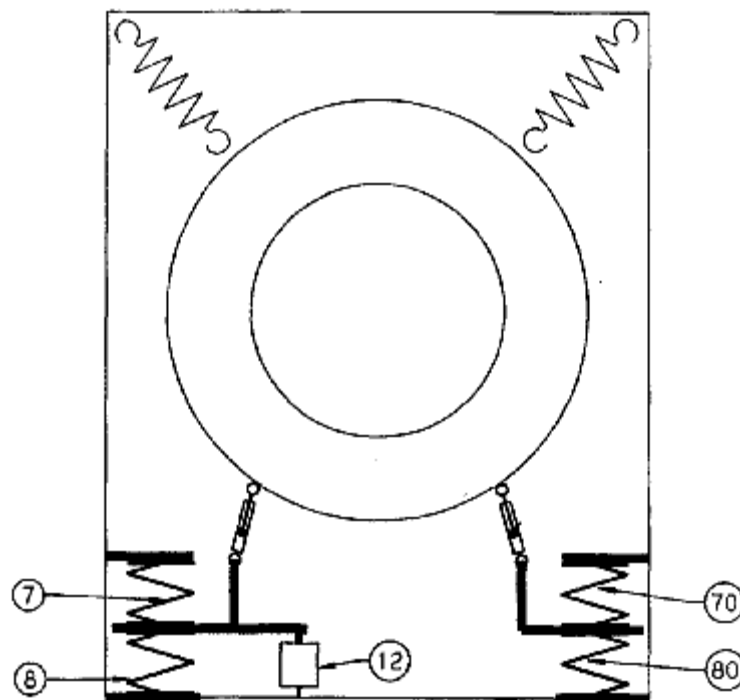


Figura 2 - Máquina de eixo horizontal com sensor de posição [2]

Na figura, 7, 8, 70, 80 representam molas de suporte, e 12 é o sensor de posição, que registra o movimento do cesto devido à massa inserida, e, com auxílio de algoritmos, transforma este deslocamento em estimação de massa.

Por ser uma das soluções mais lógicas de se implementar, é a mais popular entre as soluções que adicionam custo ao produto. Outra vantagem desta solução é o tempo necessário para calcular a massa, praticamente nulo, uma vez que dependa apenas das equações implementadas no software embarcado, isto é, o código que é gravado na placa de controle da máquina de lavar.

Outro sensor de deslocamento também utilizado é um sensor de deslocamento de campo magnético, onde existe um emissor gerador de campo magnético e um receptor. A mudança de distância entre estes sensores causa variação no campo magnético, tornando possível uma inferência sobre a quantidade de carga colocada no interior do cesto.

3.1.2: Estimação de massa utilizando uma célula de carga

Outra solução utilizada com menor frequência, que se aplica à máquinas tanto de eixo horizontal quanto vertical, é o uso de uma célula de carga nos amortecedores das máquinas.

O uso da célula de carga praticamente transforma a máquina em uma balança, garantindo alta precisão e resposta imediata.

Tendo em vista que o grande desafio das indústrias em geral é ter um produto diferenciado e com o menor preço possível, esta solução pode ter um ponto negativo, pois aumenta o custo do produto final. Em contrapartida, possui baixo tempo de resposta.

3.1.3: Estimação de inércia por meio de rotação de um *impeller*

Algumas máquinas de lavar de eixo vertical possuem um *impeller* invés de um agitador, aumentando assim, a capacidade da máquina e facilitando para o usuário o processo de carregamento. Outra vantagem do *impeller* é o fato de não “danificar” tanto as roupas durante o ciclo de lavagem, uma vez que ação mecânica que o *impeller* exerce com a roupa é menor comparado com o agitador. A Figura 3 ilustra o um *impeller* e seu posicionamento em uma máquina

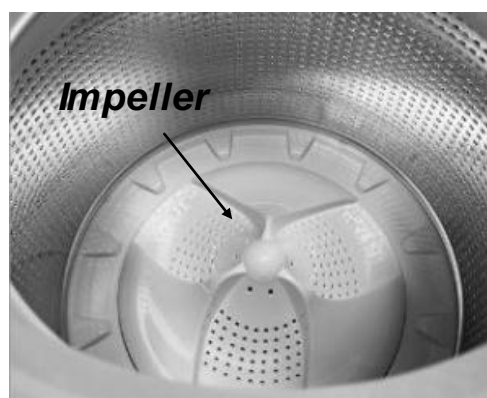


Figura 3 - Exemplo de um impeller em uma máquina

Uma solução desenvolvida por uma empresa é calcular a massa do sistema por meio de pequenas rotações no *impeller*. O torque estimado pela placa varia conforme a variação de roupa no interior da mesma devido à força normal que a carga exerce sobre o *impeller*, tornando possível definir parâmetros do ciclo com base nestes cálculos.

Embora essa solução não possua uma precisão tão boa quanto as outras já apresentadas, destaca-se a ausência de sensor para esta rotina, o que, na prática, representa uma *feature* a mais no produto sem necessidade de aumento de custo. Outra desvantagem é o aumento no tempo do ciclo total da máquina devido à execução da rotina.

3.2: Algoritmos utilizados pela Whirlpool

Dentre os principais métodos utilizados/estudados pela Whirlpool, destacam-se a estimação de massa por meio de uma célula de carga e a estimação de massa por meio da inércia.

Devido à sua facilidade e simplicidade no que diz respeito à sua implementação, o uso da célula de carga é sempre uma alternativa para a empresa. A decisão do uso deste sistema depende de vários fatores, com destaque para necessidade de precisão, faixa de preço em que o produto será alocado e nos casos onde o sistema não possui recursos suficientes para estimar a carga no interior do cesto por meio de software.

Um conceito de estimação de carga por inércia, para máquinas de eixo vertical foi patenteado há alguns anos pela Whirlpool e consiste em calcular a inércia do sistema com base em equações físicas a partir de dados de tensão e corrente do motor e em seguida estimar massa baseada na inércia calculada. Uma breve introdução teórica será feita antes de apresentar o conceito que se aplicará em cada plataforma.

3.2.1: Estimação de carga por meio da inércia

Assim como na dinâmica linear, a dinâmica rotacional também possui diversas equações que explicam o movimento circular de um corpo. A segunda lei

de Newton para sistemas em rotação define o torque τ aplicado a um sistema rotacional como:

$$\tau = J\alpha \text{ ou } \tau = J\dot{\omega}$$

onde J é o momento de inércia do sistema e α (ou $\dot{\omega}$) é a aceleração angular. Esta definição, embora correta para a física básica, considera um sistema sem atrito.

Para uma análise mais detalhada, duas componentes devem ser adicionadas a esta equação: o atrito viscoso, que ocorre devido aos rolamentos da máquina e o atrito estático, conhecido como Torque de Coulomb. O atrito viscoso gera um torque em sentido contrário do movimento que é diretamente proporcional a velocidade em que o sistema está girando. O Torque de Coulomb pode ser definido como uma força constantemente aplicada no sentido contrário da rotação, conforme mostra a Figura 4.

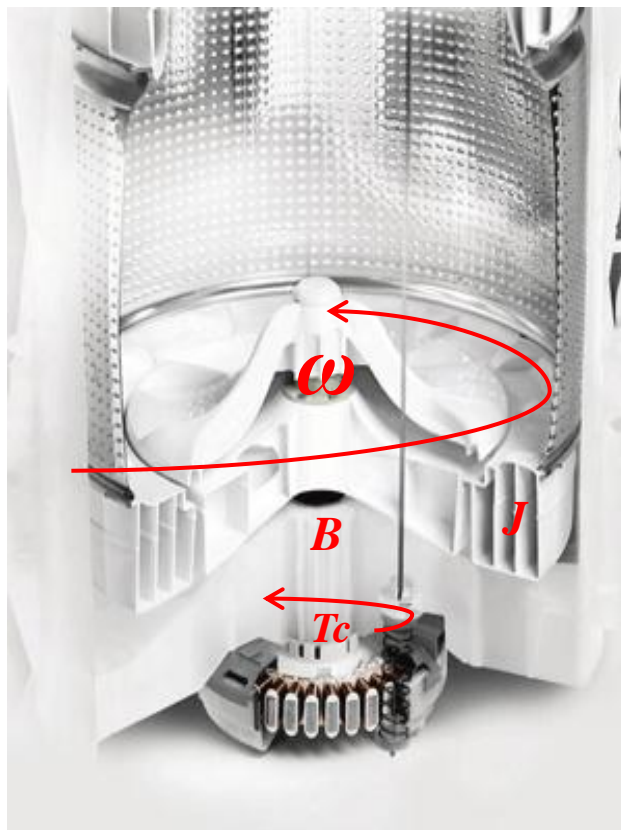


Figura 4 - Esquemático de uma máquina de lavar e suas forças

Com o acréscimo destes dois componentes, uma nova equação do torque pode ser obtida: [8]

$$\tau(t) = J\dot{\omega}(t) + B\omega(t) + T_c \quad (3.1)$$

onde B é o coeficiente de atrito viscoso do sistema e T_c é o coeficiente de atrito estático.

Estes dois componentes têm grande importância na dinâmica de uma máquina de lavar, devido ao fato de o sistema trabalhar sempre em altas rotações, tornando a componente do atrito viscoso muitas vezes na mesma ordem de grandeza da componente de aceleração. O Torque de Coulomb tem papel importante quando o sistema encontra-se em baixa rotação.

A ideia proposta para estimação de inércia do sistema é composta de duas fases: aceleração do sistema até certa velocidade (primeira fase) e logo em seguida uma desaceleração (segunda fase), com o intuito de cancelar o atrito e calcular o momento de inércia do sistema.

Com base na equação 3.1, o torque constante aplicado a um sistema com em rotação com aceleração angular positiva e constante α_{up} em um tempo t pode ser definido por:

$$\tau_{up}(t) = J\alpha_{up}(t) + B\omega(t) + T_c$$

por consequência, o torque médio necessário para levar o sistema de uma velocidade $\omega(t_0) = \omega_0$ até uma velocidade $\omega(t_{end}) = \omega_{end}$, com aceleração constante, será:

$$\bar{\tau}_{up} = J\alpha_{up} + B\left(\frac{\omega_{end} - \omega_0}{2} + \omega_0\right) + T_c \quad (3.2)$$

A aproximação do termo em função do atrito viscoso pode ser feita, uma vez que o aumento do efeito deste atrito é linear. Logo, o torque médio ao longo da curva de subida pode ser definido com o torque na mediana entre a velocidade inicial e a velocidade final.

Reciprocamente, o cálculo do torque médio aplicado ao sistema com uma aceleração angular negativa e constante α_{down} , partindo da velocidade final que o sistema atingiu no período de aceleração ω_{end} até sua velocidade inicial ω_0 pode ser definido por

$$\bar{\tau}_{down} = J\alpha_{down} + B\left(\frac{\omega_{end} - \omega_0}{2} + \omega_0\right) + T_c \quad (3.3)$$

Considerando que, em módulo, o valor da aceleração e desaceleração do sistema sejam o mesmo, é possível afirmar que

$$\alpha_{up} = -\alpha_{down} = \alpha$$

Com base nas equações 3.2 e 3.3, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{up} = J\alpha + B\left(\frac{\omega_{end} - \omega_0}{2} + \omega_0\right) + T_c \\ \bar{\tau}_{down} = -J\alpha + B\left(\frac{\omega_{end} - \omega_0}{2} + \omega_0\right) + T_c \end{cases}$$

Ao subtrair uma equação da outra, os termos relacionados aos coeficientes de atrito viscoso e estático serão cancelados, resultando em:

$$\bar{\tau}_{up} - \bar{\tau}_{down} = 2J\alpha$$

Isolando o termo do momento de inércia do sistema, obtém-se:

$$J = \frac{\bar{\tau}_{up} - \bar{\tau}_{down}}{2\alpha}$$

Desta forma, é possível calcular o momento de inércia da carga dentro da máquina de lavar apenas fazendo com que o sistema vá até certa velocidade e volte. Este é o conceito que será apresentado como metodologia da Whirlpool para estimar a inércia do sistema, tornando possível, posteriormente, o cálculo da massa que foi inserida no cesto.

Um ponto negativo desta metodologia é o tempo que se adiciona ao ciclo total da máquina, necessário para execução da rotina. Este ponto geralmente é recorrente em sistemas onde se opta pela não utilização de sensores para realizar esta tarefa. O grande esforço deste trabalho focará na implementação desta solução com maior precisão possível.

Em seguida, será apresentado de forma sucinta as duas plataformas em que o algoritmo foi desenvolvido, e os desafios de cada uma delas.

3.2.1.1: Plataforma 1

Esta plataforma já encontra-se no mercado norte-americano há alguns anos, porém sem a implementação do algoritmo de estimação de carga, que fará parte das novas funções da nova versão do produto, prevista para 2013. Antes do início deste trabalho, já havia sido feita uma fase preliminar de desenvolvimento do algoritmo, porém com poucos testes e validações.

O grande desafio do trabalho nesta plataforma são as limitações do sistema, por ser mais antigo. Maiores detalhes serão explicados no próximo capítulo.

3.2.1.2: Plataforma 2

Esta segunda plataforma encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento, com intuito de substituir a plataforma atual. É uma plataforma mais nova, com novos recursos tanto de software quanto de hardware. O principal foco deste trabalho será o desenvolvimento aplicado a esta plataforma. No próximo capítulo poderão ser vistos os estudos iniciais realizados, bem como as etapas de teste, desenvolvimento e validação do sistema. Por fim, será feita uma breve explicação das próximas etapas e perspectivas sobre o trabalho nesta plataforma.

Capítulo 4: **Desenvolvimento e implementação**

O presente capítulo tem por objetivo mostrar todas as etapas de desenvolvimento e implementação do algoritmo de estimação de carga para as duas plataformas citadas anteriormente.

Primeiramente será apresentada a metodologia para desenvolvimento de projetos utilizada na Whirlpool, e algumas das ferramentas utilizadas ao longo do trabalho. Em seguida, será feita uma contextualização sobre a situação atual do algoritmo em cada uma das plataformas, seguido por testes de variação, robustez, validação e implementação.

Devido a questões de confidencialidade, as variáveis analisadas e os resultados apresentados estarão todos normalizados, de forma a evitar que informações confidenciais tornem-se de domínio público, mas ainda assim trazendo ao leitor um certo nível de compreensão dos resultados que não prejudique o trabalho.

4.1: Metodologia Seis Sigma

O uso da metodologia Seis Sigma na Whirlpool começou em 1997, nos Estados Unidos, e em 2002, na América Latina. Esta metodologia trabalha de forma sistemática, utilizando perguntas chave que levam às respostas certas. Todos os projetos Seis Sigma são resolvidos encontrando-se a raiz das variações, onde um certo indicador a ser melhorado está em função de diversas outras variáveis que influenciam em seu resultado final.

A metodologia Seis Sigma pode ser utilizada em qualquer setor ou empresa, e em vários níveis de complexidade. Esta metodologia não deve se resumir simplesmente na aplicação de técnicas estatísticas, apesar de sua denominação estar relacionada a uma medida estatística de dispersão: o desvio padrão. O planejamento, a definição de metas precisas e ambiciosas, a busca do comprometimento e integração dos trabalhadores, a adaptação a nível estrutural, o realinhamento cultural e a valorização das lideranças são aspectos vitais para o sucesso. [9]

Quem aplica esta metodologia à um processo deve primeiramente estudar o processo e conhecer suas variáveis, para assim fazer com que o controle das mesmas resultem na melhoria do seu indicador. Na prática, é definido como um conjunto de ferramentas estatísticas utilizadas para variação via metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) ou PDSA (*Plan, Do, Study, Act*). No caso deste trabalho, será utilizada a metodologia PDSA. A Figura 5 ilustra o funcionamento contínuo do ciclo PDSA, visando sempre a melhoria na qualidade do processo.

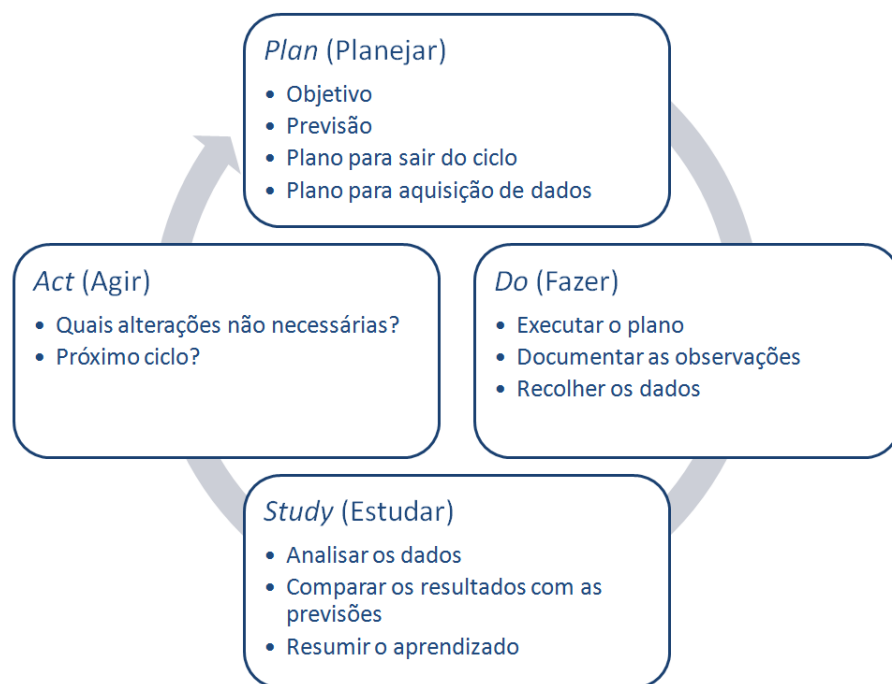


Figura 5 - Ilustração do funcionamento do ciclo PDSA

Na primeira etapa (*Plan*), são criados os objetivos do projeto. O processo é estudado e testes são planejados. É feita uma previsão dos resultados do teste para posterior confronto. Na segunda etapa (*Do*), ocorre a execução dos testes, documentação dos problemas e de variações não esperadas. A terceira etapa (*Study*) é a etapa onde confrontam-se os resultados encontrados com as previsões. É aqui que se concentra o estudo dos resultados antes das implementações. Na última etapa (*Act*) as teorias são modificadas com base nos estudos realizados e processos alternativos podem ou não serem desenhados. Se no final, algumas variáveis ainda não tenham sido esclarecidas, deve-se iniciar novamente a primeira etapa, realizando novos testes, e assim por diante.

A seguir serão apresentados algumas ferramentas utilizadas pertencentes à metodologia Seis Sigma, e como estas ferramentas se encaixam no ciclo PDSA.

4.1.1: Cartas de controle

Carta de controle é o tipo de gráfico utilizado para o acompanhamento de um processo ou variável ao longo do tempo. Este gráfico determina estatisticamente uma faixa denominada limites de controle. Seu objetivo é verificar, por meio do gráfico, se um determinado processo está sob controle, isto é, isento de causas especiais. [4]

Esta ferramenta pode ser usada em vários casos: para testar se um maquinário está produzindo peças dentro de uma especificação, se uma certa variável monitorada por um sensor pode ser classificada como estatisticamente estável, etc. Esta classificação pode ser feita por meio de diversas regras, sendo a mais comum, quando o sistema ultrapassa um dos limites de controle, seja ele o superior ou o inferior. Os limites de controle geralmente são definidos pelo valor médio da variável somados (para o limite superior) ou subtraídos (para o limite inferior) de três vezes o desvio padrão do sinal. Esta metodologia também é utilizada para validar sistemas de medição, entendendo possíveis inconsistências nas medições realizadas. Seu uso está atrelado à fase de Estudos (*Study*) do ciclo PDSA.

4.1.2: Mapa de Processo

O mapa de processo é uma ferramenta que mostra o conhecimento atual do processo e é um suplemento de muitas ferramentas tradicionais na investigação de processo. Ele combina os fluxogramas de processo comuns com o tipo de conhecimento capturado nos diagramas de causa e efeito. A construção a priori do mapa de processo pode aumentar consideravelmente a eficácia das técnicas estatísticas ao facilitar o raciocínio crítico necessário para se obter e utilizar um entendimento da relação entre as variáveis de processo e as características do produto. Como um documento de trabalho, o mapa de processo é usado para capturar continuamente o estado existente de conhecimento do processo e os meios de gerenciamento deste conhecimento. [10]

Esta ferramenta auxilia em duas etapas do ciclo PDSA: Planejar (*Plan*) e Estudar (*Study*), uma vez que a primeira etapa pode ser feita com o auxílio de um Mapa de Processo, e a segunda serve para auxiliar na confecção propriamente dita do mapa.

4.1.3: Mapa de Raciocínio

O Mapa de Raciocínio é um processo de documentação contínua do projeto, onde são documentados os conhecimentos existentes, perguntas, caminhos paralelos traçados para responder estas perguntas, ferramentas utilizadas para elaboração das respostas, documentação do conhecimento obtido durante o trabalho realizado e direção do trabalho futuro. [6]

Um Mapa de Raciocínio é capaz de englobar todo o ciclo PDSA, onde existem as discussões dos problemas, possíveis soluções, planejamentos e resultados de testes, conclusões obtidas e próximos passos executados após cada um destes testes.

É um documento extenso, porém, fácil de entender, quando bem feito, tornando possível analisar e documentar todas as possíveis soluções previstas para resolver um problema. A Figura 6 mostra o mapa de raciocínio desenvolvido ao longo do projeto do algoritmo de estimação de carga na Plataforma 1 (apenas a título de ilustração).

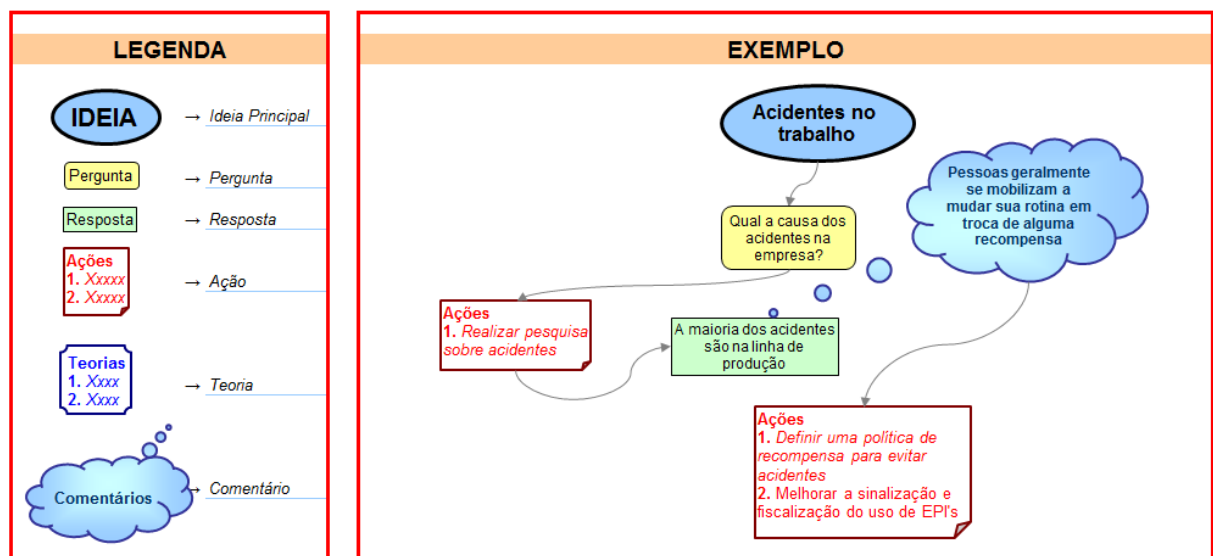


Figura 6 - Exemplo de mapa de raciocínio utilizado

4.1.4: DOE

O DOE (*Design of Experiment*), é um método sistemático que determina a relação entre fatores que afetam um processo e sua saída. Na prática, é utilizado para determinar relações de causa-efeito. Esta informação é necessária para gerenciar entradas do processo com intuito de otimizar sua saída. [5]

Um fato importante é que o projetista não precisa (e nem é seu objetivo) levantar equações diferenciais que modelem o sistema a ser testado, mas sim desenvolver um conjunto de medições que crie dados suficientes para provar estatisticamente essas relações, de forma a entender a influência das variáveis de entrada na saída do sistema.

Consiste resumidamente em três fases: o planejamento, onde deve-se cuidadosamente decidir quais variáveis devem ser analisadas; a execução, que deve ser feita com atenção para evitar possíveis erros de interpretação dos resultados ou necessidade de refazer os testes; e a análise dos dados, responsável pelas conclusões e teorias resultantes com base nos testes realizados. Relacionado ao ciclo PDSA, estas três fases encaixam-se, respectivamente, em Planejar (*Plan*), Fazer (*Do*) e Estudar (*Study*).

4.1.4.1: FRD

O *Factor Relationship Diagram*, ou FRD, é um conjunto de ferramentas que auxiliam no entendimento e tomadas de decisões em relação à potenciais informações contidas em um experimento e o custo desta informação em relação à ordem e tamanho do experimento. Na prática, é uma ferramenta gráfica, esquemática, que retrata a relação entre potenciais fontes de variação em um DOE.

A seguir, será apresentado com maiores detalhes como foi feito o desenvolvimento e implementação do algoritmo nas duas plataformas já citadas.

4.2: Plataforma 1

A presente seção tem por objetivo detalhar o desenvolvimento e implementação do algoritmo de estimação de carga na Plataforma 1. É importante salientar que todo o trabalho e decisões de testes realizados na seção 4.2 e 4.3 foram feitos baseados no Mapa de Processo do sistema, e toda a documentação foi

feita utilizando como ferramenta principal, o Mapa de Raciocínio, utilizado para mostrar questionamentos, pesquisas, testes e resultados, abordando o ciclo PDSA como um todo.

4.2.1: Situação atual do algoritmo

Para explicar a situação em que se encontrava o algoritmo no início deste trabalho, primeiramente, as limitações da plataforma, e em seguida, os testes que já haviam sido realizados.

4.2.1.1: Limitações da plataforma

Inicialmente, o algoritmo de estimação de carga tinha por objetivo ser implementado conforme descrito no Capítulo 3. Porém, a teoria do algoritmo exige certas funções no sistema, como “estimação” de algumas variáveis não disponíveis através de sensores. Infelizmente, a plataforma em discussão não é capaz de estimar o valor de torque aplicado ao motor.

Além disso, o sistema não era capaz de frear com aceleração controlada, impossibilitando qualquer cálculo durante o período de descida na dinâmica proposta no Capítulo 3.

Com isso, existe a opção de desenvolver o algoritmo utilizando outras variáveis ou simplesmente abortá-lo. Estudos de viabilidade foram feitos, e optou-se pela implementação de um algoritmo alternativo, através de correlações de grande parte empírica, porém com variáveis que, juntas, representariam diferentes comportamentos do sistema, dependendo da sua quantidade de carga.

Vários testes foram executados seguindo a metodologia Seis Sigma, para verificar como certas variáveis do sistema eram afetadas devido a diferentes cargas na máquina, de forma a entender o efeito das variáveis de entrada na dinâmica do sistema. Além disso, foi feito um estudo de componentes de variação, identificando que diferentes valores de algumas variáveis influenciavam na estimação de outras, sendo estas variáveis aqui denominadas variáveis secundárias, e as variáveis que são alteradas diretamente com a mudança de carga no cesto, variáveis primárias.

Por fim, o design escolhido conta com quatro variáveis no total, sendo duas primárias e duas secundárias, que serão nomeadas aqui de Variável 1, 2, 3 e 4. A

Variável 1 é calculada com base em tensões e correntes do motor que são medidos pelas placas. A Variável 2 é uma variável temporal obtida no meio da curva de cálculo de massa. As Variáveis 3 e 4 são grandezas físicas obtidas por meio de sensores conectados à placa.

4.2.1.2: Testes já realizados

Como explicado no tópico anterior, os primeiros testes realizados foram para definir os principais parâmetros para a estimação de carga no sistema.

Uma vez definidas, novos testes podem ser feitos para que seja feita uma calibração do sistema, onde espera-se como resposta uma equação para a estimação de carga, em função das quatro variáveis definidas.

Os testes de calibração são feitos variando a quantidade de carga na máquina, bem como as variáveis secundárias, e lendo os valores estimados para as quatro variáveis propostas no algoritmo.

Uma analogia a estes testes pode ser feita com um sistema de controle de várias entradas e uma saída, onde são feitas pequenas excitações em cada uma das entradas e checando a resposta do sistema para cada entrada. Estas excitações podem acontecer individualmente, para verificar a influência primária de cada variável, e em grupo, verificando efeitos conjuntos ou iterações entre duas ou mais variáveis que possam causar efeito significativo na saída do sistema.

Devido ao sistema ser limitado, não haviam grandes expectativas nos resultados destes testes. A intenção é poder distinguir a quantidade de carga em apenas dois níveis dentro da faixa de operação do produto, por exemplo, carga leve e carga pesada.

A primeira calibração foi feita com os recursos do laboratório de Joinville, contendo apenas uma máquina da última versão da plataforma, limitando, de certa forma, o espaço de inferência do algoritmo.

Os resultados da calibração foram satisfatórios, uma vez que todos os testes com 2 níveis de cargas (uma considerada carga pesada e outra carga leve) foram classificados corretamente pela equação de calibração. A Figura 7 mostra dados normalizados da massa estimada onde é possível ver a existência de um limiar que

separa as duas cargas testadas, gerados a partir de uma bateria de testes com diferentes tipos de tecidos e diferentes massas.

O tipo de figura apresentado a seguir se chama diagrama de variabilidade. Este tipo de diagrama é construído para estudar como uma medição varia entre diversas categorias. Junto com os dados é possível visualizar a média, a faixa de valores, entre outros fatores opcionais dos resultados dos testes, dependendo da classificação. Diagramas de variabilidade são diagramas que representam de forma muito satisfatória resultados de FRD's e DOE's. Isto é, cada diagrama apresentado neste trabalho representa o resultado de uma árvore de testes planejada para verificar o efeito da variação de parâmetros em alguma variável do sistema.

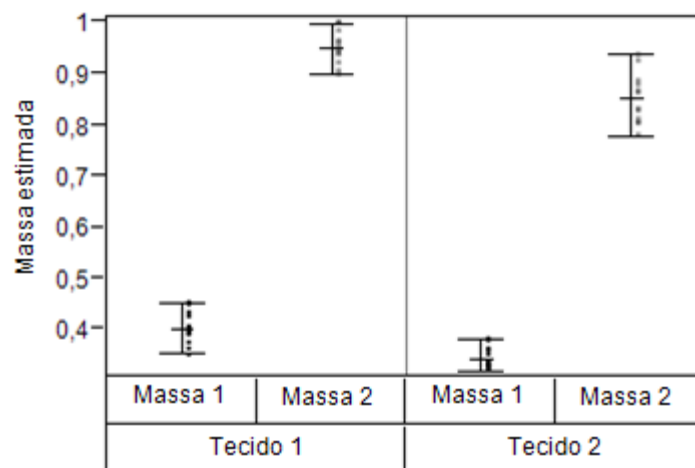


Figura 7 - Resultado normalizado da primeira calibração do sistema

Embora os resultados sejam satisfatórios, existe a necessidade de testar a robustez do sistema no que diz respeito a diferentes máquinas, bem como a possibilidade de melhorar o sistema mudando algumas de suas configurações.

É neste ponto que começa o desenvolvimento deste trabalho. A próxima seção retratará os testes feitos verificando a robustez do algoritmo de máquina para máquina.

4.2.2: Testes de validação – Variação de máquina para máquina

Para a realização do teste de robustez do sistema, é necessário que o algoritmo seja capaz de diferenciar estes dois níveis em qualquer máquina, pois de nada vale um algoritmo que funcione dentro de um laboratório mas não apresente bons resultados na casa do consumidor.

A primeira bateria de testes de variação considera o sistema como um todo, sem procurar causas específicas de variação. Portanto, um plano de testes foi enviado para a equipe de centro de tecnologia em Lavanderia de Rio Claro, para que eles pudessem testar o algoritmo proposto.

Os mesmos testes apresentados na Figura 7 foram rodados em duas máquinas do mesmo modelo em Rio Claro, de modo a comparar e validar os dados obtidos em Joinville com diferentes quantidades e tipos de tecido. A Figura 8 mostra o resultado normalizado comparando as três máquinas.

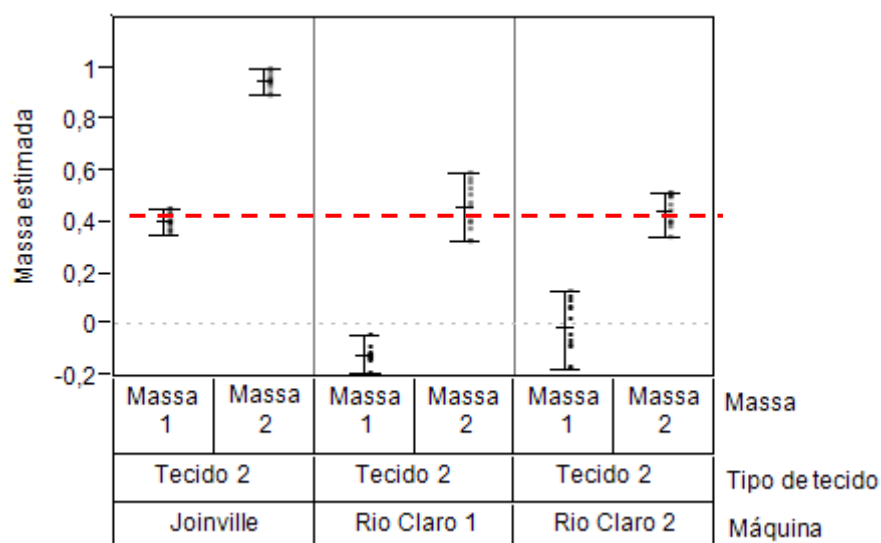


Figura 8 - Resultado da primeira calibração executado em três máquinas

Pode-se perceber que os dados feitos em Rio Claro apresentam erro de estimação para as cargas maiores, onde, dependendo do limiar, poderiam ser classificadas erroneamente como cargas leves, fazendo com que a estimação do algoritmo esteja incorreta.

Antes de realizar uma análise detalhada das causas desta variação, foi feita uma segunda calibração, agora baseando-se nos dados das três máquinas. A Figura 9 mostra a massa estimada do sistema variando os mesmos parâmetros que foram variados anteriormente, após a segunda calibração.

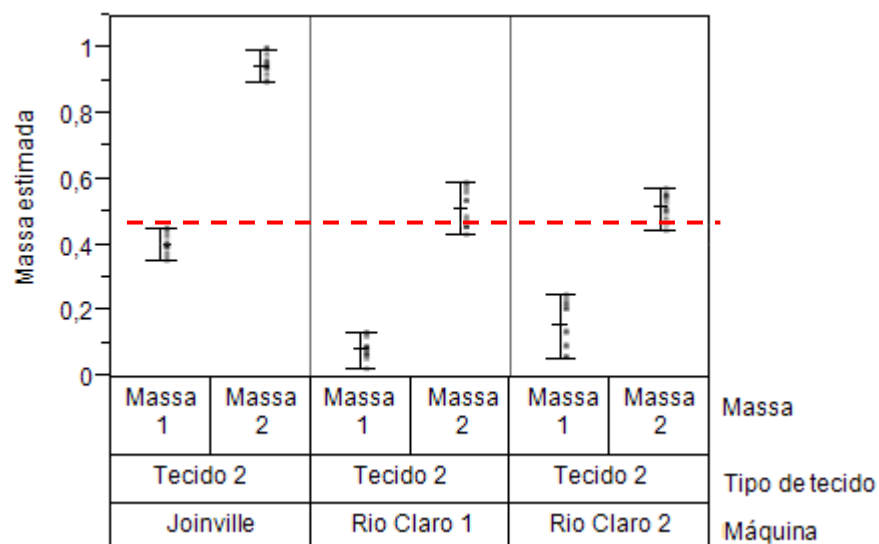


Figura 9 - Resultado do algoritmo após recalibração

É possível perceber que existe um pequeno erro de classificação, pois pontos da “carga leve” interceptam pontos da “carga pesada”. Foram rodados também testes em máquinas no laboratório dos Estados Unidos, e os resultados mostraram a mesma discrepância no que diz respeito ao algoritmo.

Devido a tal discrepância, novas análises devem ser feitas, para garantir a continuidade do algoritmo. Por este motivo, optou-se trabalhar com análises mais detalhadas seriam feitas, e se necessário, componentes da plataforma seriam analisados a fundo.

O primeiro passo para esta análise é verificar as variáveis primárias que compõem a equação de estimação de carga. A Figura 10 mostra a variação da Variável 1 para as medições de calibração mostradas anteriormente, comparando diferentes máquinas e massas.

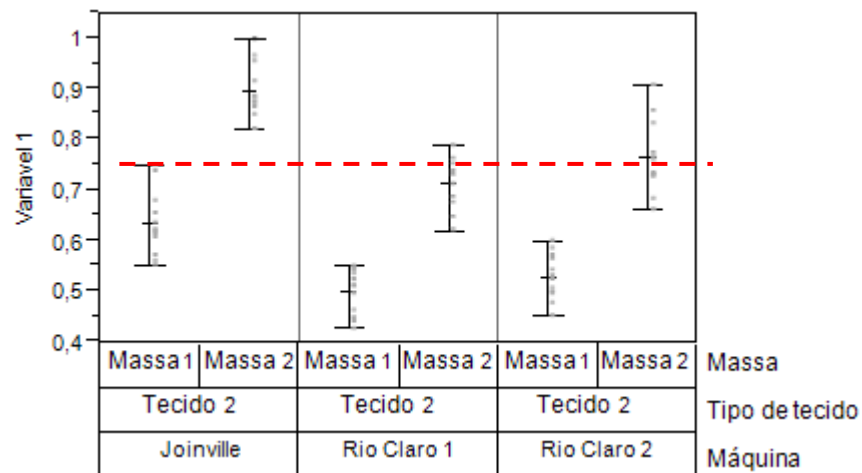


Figura 10 - Análise de variação da Variável 1

Assim como a própria massa estimada, é possível ver que dados da carga maior se interceptam com alguns dados de carga menor, o que é indesejável para a saída do algoritmo.

Outro ponto importante é a diferença de magnitude dos resultados, que influenciam diretamente no resultado da equação. Além disso, estas medições apresentaram, em geral, uma alta variação de rodada para rodada da variável 1, algo inesperado, uma vez que os testes foram executados sob as mesmas condições.

O componente do sistema responsável por estimar e fornecer a Variável 1 é a placa de controle do sistema. Uma análise mais detalhada será feita na Seção 4.2.4.

A Figura 11 mostra a variação da Variável 2 para as medições de calibração feitas anteriormente, variando máquina e massa.

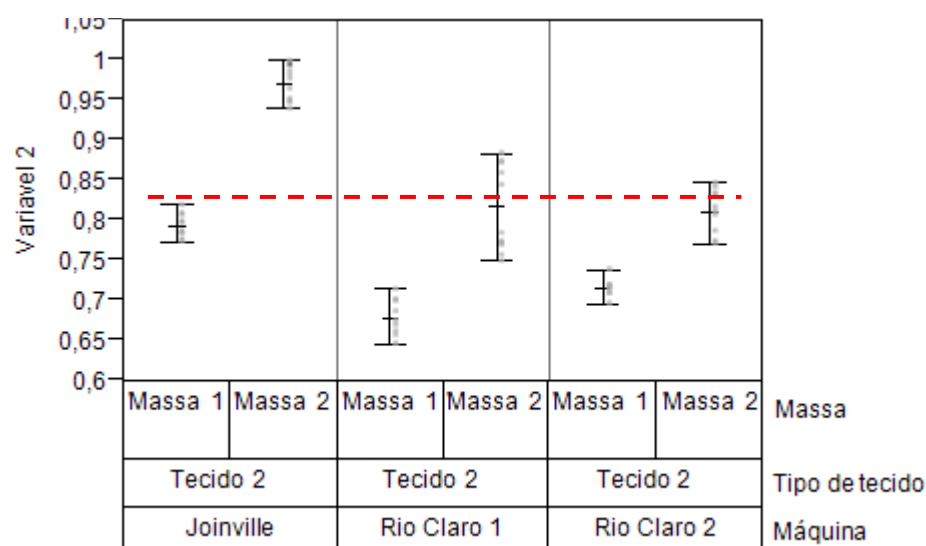


Figura 11 - Análise de variação da Variável 2

Assim como aconteceu com a Variável 1, esta variável também mostrou grande variação entre as duas máquinas, principalmente no que diz respeito à magnitude, onde em algumas máquinas com carga pesada a variável teve o mesmo valor do que outra máquina com carga leve. Ambas as variáveis foram analisadas utilizando Cartas de Controle, onde foi possível verificar estatisticamente estas inconsistências.

Em contrapartida, na maioria dos casos esta variável apresentou alta precisão de rodada para rodada, onde a pequena variação encontrada estava dentro do valor esperado, por ser uma consequência de testes rodados consecutivamente.

A fonte desta variação de magnitude pode vir de dois fatores: da dinâmica da máquina, que será verificado a seguir, e do motor da mesma, que será verificado na Seção 4.2.3.

No que diz respeito à dinâmica da máquina, qualquer variação no coeficiente de atrito de duas diferentes máquinas podem levar a grandes variações na Variável 2. Por isso, será feita uma análise aprofundada do coeficiente de atrito das máquinas em questão.

4.2.2.1: Determinação do coeficiente de atrito de uma máquina

Conforme explicado no Capítulo 3, o coeficiente de atrito pode ser obtido através de algumas medições em diferentes pontos de operação, verificando qual o

torque necessário para manter a máquina girando sem aceleração, isto é, o torque necessário para eliminar os efeitos do atrito.

Porém, como já foi explicado, esta plataforma não é capaz de estimar o torque, tornando necessária uma outra abordagem para estimar o coeficiente de atrito.

Para estimação dos coeficientes de atrito, será considerada a mesma equação 3.1 apresentada no Capítulo 3, porém, considerando torque nulo:

$$J\dot{\omega} + B\omega + T_c = 0$$

Esta equação diferencial pode ser aplicada para qualquer sistema em rotação onde em certo momento o torque deixa de ser aplicado e o sistema fica entra em regime transitório, até parar de girar, devido às forças de atrito. Considerando ω_0 a velocidade angular inicial do sistema assim que o torque deixa de existir, isto é, $\omega(0) = \omega_0$, a solução da equação diferencial é dada por:

$$\omega(t) = \left(\omega_0 + \frac{T_c}{B} \right) e^{-tB/J} - \frac{T_c}{B}$$

É importante notar que este modelo possui uma inconsistência, pois:

$$\omega(t) = -\frac{T_c}{B}, \quad t \rightarrow \infty$$

Logo, este modelo é valido apenas no intervalo $t = [0, t']$, onde $\omega(t') = 0$.

Considerando este ponto final da curva, é possível escrever a equação de outra maneira:

$$t' = -\frac{J}{B} \ln \left(\frac{T_c}{B\omega_0 + T_c} \right)$$

Experimentalmente é possível aplicar este conceito deixando de aplicar torque ao sistema em uma certa velocidade angular conhecida, medindo o tempo que o mesmo leva para parar.

Utilizando duas velocidades iniciais diferentes e conhecendo a inércia do sistema, tem-se um sistema de duas variáveis e duas equações. Com o auxílio de qualquer função de resolução de sistemas não lineares é possível obter os dois coeficientes de atrito da máquina.

Foram feitas seis medições com duas velocidades diferentes, e em seguida, calculada a média do tempo de parada para cada uma das velocidades. As medições foram feitas sem carga no cesto, minimizando erros de estimação do momento de inércia, uma vez que a inércia do cesto vazio já havia sido calculada anteriormente por outro setor.

Após obter os coeficientes, restou validar o sistema obtido. A Figura 12 mostra a curva teórica com os coeficientes de atrito calculados e pontos de medição experimental.

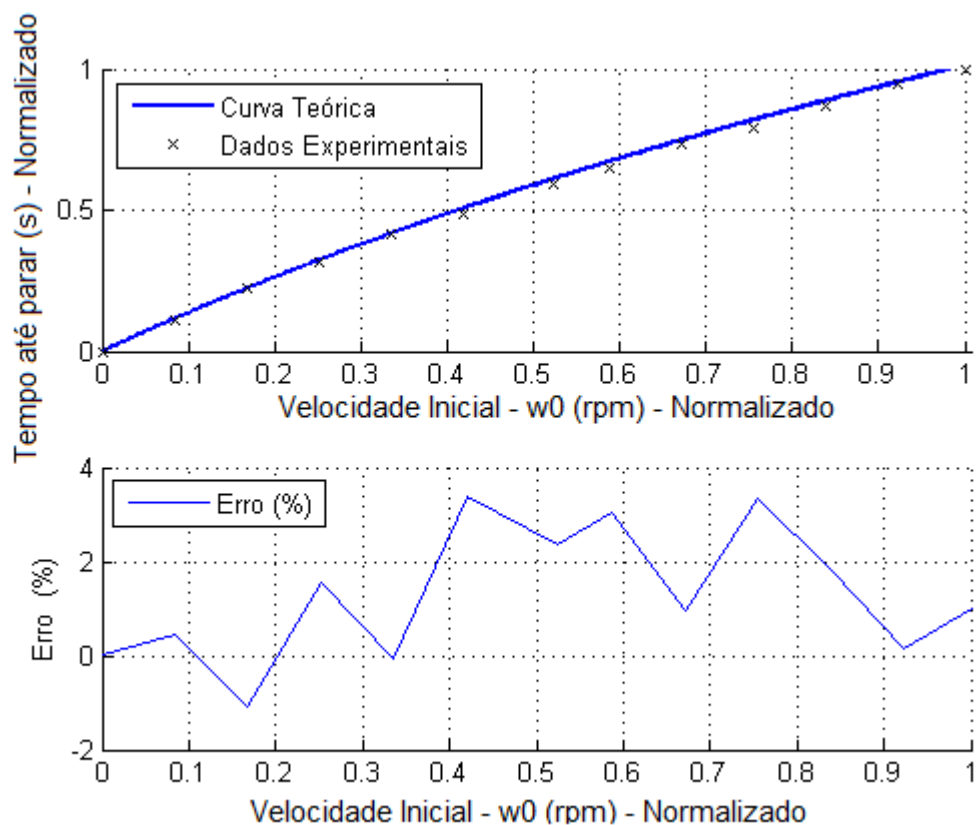


Figura 12 - Validação da estimação do coeficiente de atrito

Uma vez validado o sistema que estima os coeficientes de atrito da máquina, o mesmo perfil de seis medições e duas velocidades foi executado nas máquinas de Rio Claro, com intuito de obter os coeficientes de atrito destas máquinas, para realizar uma comparação com os coeficientes calculados na máquina que encontra-se em Joinville.

A Figura 13 retrata a comparação dos coeficientes de atrito normalizados entre as três máquinas estudadas até agora.

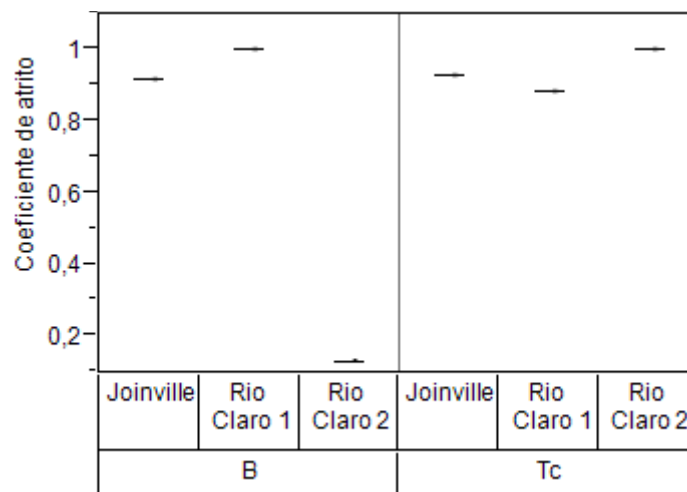


Figura 13 - Variação do coeficiente de atrito nas máquinas testadas

Na faixa de velocidade utilizada, o componente de atrito mais relevante é o Torque de Coulomb, e esta pequena variação já faz com que haja grandes variações na métrica Variável 2. O próximo teste para verificar diferenças na Variável 2 será o teste de variação de motor para motor, apresentado a seguir.

4.2.3: Testes de validação – Variação de motor para motor

Para realizar os testes de variação de motor, foram utilizados quatro motores do mesmo modelo disponíveis no laboratório de Joinville. A intenção destes testes é verificar a possível existência de influência do motor na métrica Variável 2.

Os testes executados consistiam em grupos de 6 repetições executados na mesma condição, considerando a máquina vazia. A Figura 14 mostra o resultado dos testes da Variável 2 com diferentes motores.

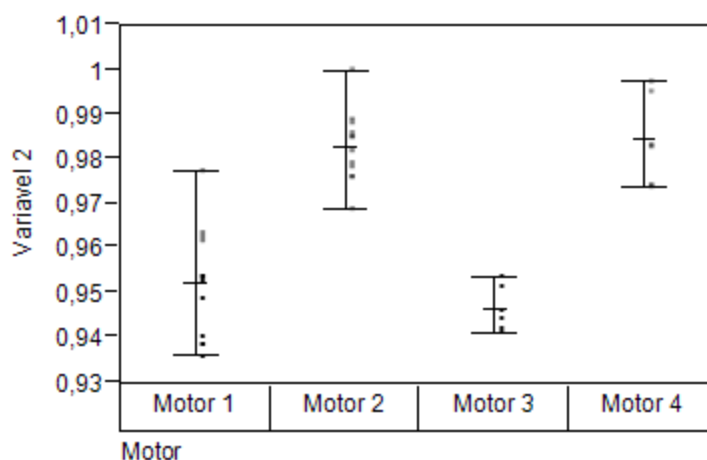


Figura 14 - Influência da variação de motor na Variável 2

É possível perceber que praticamente não há grande variação decorrente de diferentes motores, pois a variação máxima obtida é de 7%.

Com isso, o grande responsável pela alta variação na Variável 2 é o coeficiente de atrito, que varia de máquina pra máquina. Esta variação pode ser causada por pequenas diferenças na produção do cesto, nas engrenagens, nos fluídos utilizados, etc., pois a especificação do produto aceita uma pequena tolerância de variação.

Possíveis soluções para esse problema serão apresentadas na seção 4.2.5.

4.2.4: Testes de validação – Variação de placa para placa

Os testes de variação de placa para placa foram feitos utilizando a mesma versão de software, onde um conjunto de seis medições foi executado na mesma máquina, com o mesmo motor, utilizando seis diferentes placas do mesmo modelo.

A Figura 15 mostra a métrica Variável 2 calculada utilizando diferentes placas.

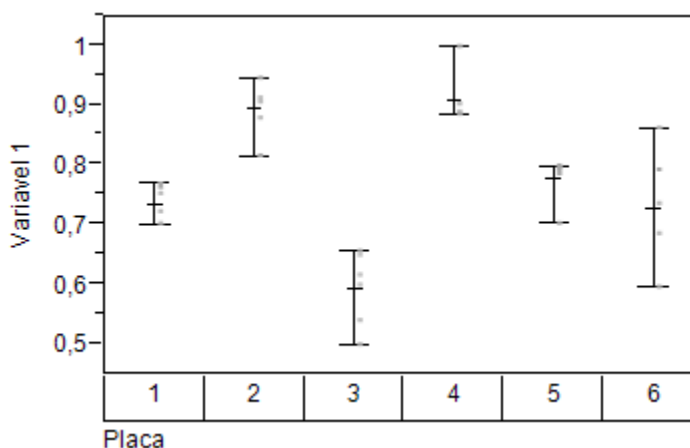


Figura 15 - Influência de diferentes placas na Variável 1

Com base na tabela mostrada, é possível perceber que além de existir uma considerável variação de placa para placa, existe também uma considerável variação de rodada para rodada.

Para tentar compensar esta variação foram tomadas as seguintes medidas:

- Melhora do filtro utilizado no software embarcado, com intuito de verificar se a causa da variação era devido a ruídos no sinal;
- Mudança nos parâmetros do cálculo da variável no software embarcado;

- Mudança nos parâmetros da curva no software embarcado. Estes parâmetros afetam diretamente o cálculo da Variável 1;
- Monitoramento da variável por meio de *jumpers* ligados à um osciloscópio, para analisar sua dinâmica.

Embora todas essas medidas tenham sido tomadas, apenas a segunda resultou em uma pequena melhora, porém não muito significativa. O monitoramento da variável por meio do osciloscópio serviu para dar certeza que o sistema não é robusto entre uma execução e outra, tornando praticamente impossível ter resultados confiáveis por meio desta variável.

4.2.5: Soluções propostas

Ao fim de um trabalho, é função da equipe dar um parecer sobre a tecnologia, sua viabilidade e limitações. Frente ao problema de variação nas duas principais variáveis, sugeriu-se como melhoria no algoritmo uma medida para cada variável.

Para melhoria da Variável 1, recomenda-se uma revisão nos componentes do circuito que afetam seu cálculo, pois são componentes com variação padrão. Até então não era necessário o uso de componentes de baixa variação devido ao fato de esta variável não ser usada para sensoriamento, mas sim, para controle e monitoramento do sistema, onde permite-se uma variação um pouco maior.

Para melhoria da Variável 2, foi recomendado a inclusão de uma rotina de calibração na linha de produção, tornando possível compensar a diferença nos coeficientes de atrito das máquinas.

Não há garantia de que nenhuma das duas sugestões sejam acatadas, uma vez que esta decisão não cabe ao grupo de desenvolvimento de algoritmos. O grande problema destas sugestões é que ambas implicam em um aumento no custo de produção, seja por adquirir componentes mais caros, ou por aumentar o tempo de produção do produto ao adicionar uma rotina de calibração.

4.2.6: Resultados obtidos

Conforme explicado no Capítulo 4, foi definido que, para um bom funcionamento do algoritmo, algumas melhorias deveriam ser feitas. Dentre os dois principais problemas encontrados, sugeriu-se a calibração em linha para corrigir o

primeiro problema, e uma revisão em parte do circuito da placa de controle para melhorar o sinal que gera uma alta variação na Variável 2.

De qualquer forma, o algoritmo atual é capaz de classificar corretamente as cargas como carga “leve” ou “pesada” com acerto em cerca de 90% dos casos testados. O espaço de inferência utilizado foram as máquinas, placas e motores existentes nos laboratórios de Joinville e Rio Claro.

É possível “simular” a calibração em linha, ao ajustar os valores da Variável 1 baseado na ideia de compensação com base em uma máquina padrão. Neste caso, a máquina padrão definida foi a máquina situada em Joinville.

Vários métodos de calibração foram testados, sendo que os três melhores serão apresentados junto com os resultados sem calibração (apresentados anteriormente no Capítulo 4). Estes resultados podem ser vistos na Figura 16, onde varia-se o método de calibração, máquina e a massa testada.

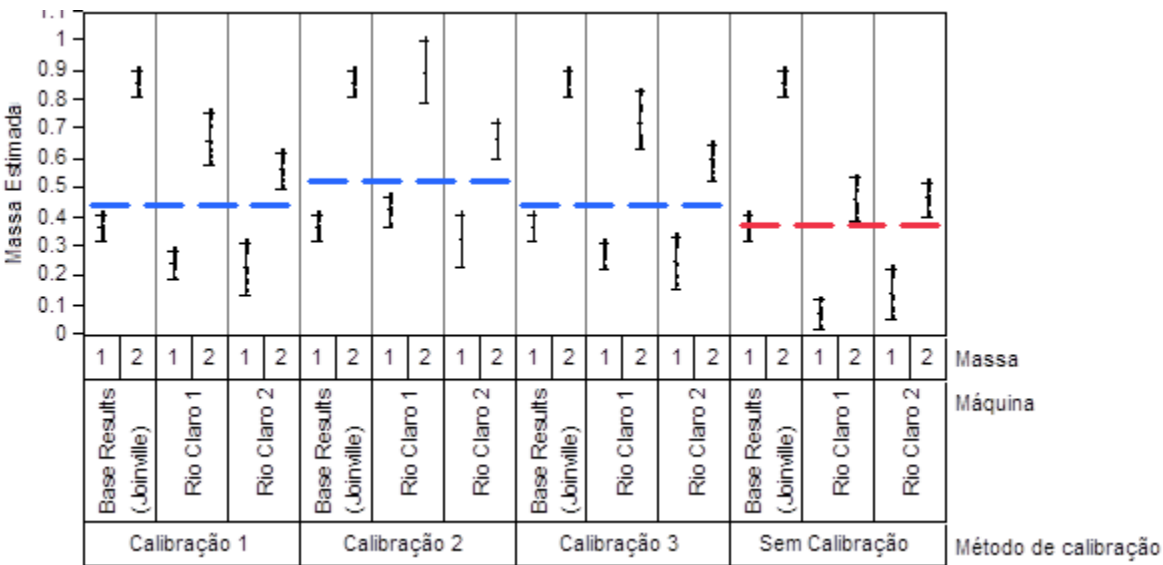


Figura 16 - Massa estimada utilizando diferentes métodos de calibração na Variável 2

Baseado nestes resultados é possível afirmar que ainda existe uma grande variação de rodada para rodada, decorrente das placas de controle. Mesmo com a variação proveniente das placas, o sistema já é capaz de distinguir a massa entre “leve” e “pesada”.

Se ambas as considerações forem implementadas, espera-se obter uma redução no desvio padrão, possibilitando que o sistema seja capaz até de detectar mais de dois níveis.

A Seção 4.3 explicará como ocorreu o desenvolvimento do algoritmo aplicado à Plataforma 2.

4.3: Plataforma 2

Na plataforma anterior, o algoritmo funcionava sem um grande embasamento físico, onde a estimacão de carga funcionava como uma aproximacão do conceito físico apresentado no Capítulo 3.

A Plataforma 2 muda todo este cenário, uma vez que conta com tecnologias mais recentes, principalmente em sua placa de controle. Como será explicado a seguir, esta plataforma permite a aplicacão do conceito apresentado anteriormente.

4.3.1: Situação atual do algoritmo

O desenvolvimento desta plataforma teve início há pouco mais de um ano, onde projetos e protótipos foram lançados, e a área de algoritmos começou a atuar no desenvolvimento focado a esta plataforma apenas a partir do segundo semestre de 2012. Por isso, o conceito apresentado anteriormente não havia sido nem testado para esta plataforma, logo, não existia nenhuma análise deste algoritmo aplicado a referida plataforma até o presente trabalho, devido a restrições de tecnologia do produto.

Para que o desenvolvimento do algoritmo ocorra com sucesso, será aplicada a metodologia Seis Sigma para resolução de problemas, onde, primeiramente, será analisada a influência de diversos fatores no algoritmo. Em seguida, será feita a análise de potenciais problemas, até o modelo de predição e sua implementacão em software embarcado.

4.3.2: Análise de influência de variáveis no algoritmo

Antes de implementar qualquer algoritmo, é extremamente necessário que seja feita uma análise detalhada de todas as variações no sistemas que podem

implicar em diferenças no resultado final. Esta análise é importante para identificar possíveis modos de falha do algoritmo, pontos fortes e fracos, etc.

4.3.2.1: Design da curva

A primeira análise feita foi dos parâmetros da curva que seria executada. Os parâmetros da curva são definidos empiricamente, porém devem ser testados buscando a maior precisão e o menor desvio padrão possível.

O principal ponto a se destacar neste sentido é a velocidade máxima que o sistema pode atingir. A ideia inicial é que o algoritmo seja executado logo no começo do ciclo, onde a carga ainda não teve contato com água, pois a ideia do algoritmo é justamente otimizar a quantidade de água e insumos consumidos, reduzir o tempo de ciclo, etc. baseado na quantidade de carga inserida.

Em contrapartida, rotacionar o cesto em alta velocidade pode danificar as roupas, pois, quando o cesto encontra-se totalmente cheio, existe o risco de pequenas peças voarem de dentro do cesto para um espaço que fica entre o próprio cesto e seu envoltório, denominado *tube*. Quando isso acontece, é considerado um evento crítico, pois prejudica o funcionamento correto da máquina, além de gerar insatisfação do usuário por perder/danificar suas roupas.

Por isso, um dos testes feitos foi uma preparação da bancada de testes para utilizar a máquina com um tacômetro para medir a velocidade e uma câmera gravando a 240 quadros por segundo, isto é, em *slow motion* com taxa de redução de oito vezes. Com isso foi possível identificar no vídeo a velocidade em que as roupas começam a se deslocar devido a força centrífuga.

Com a velocidade identificada, foi possível definir o valor máximo de velocidade que o algoritmo poderia atingir.

4.3.2.2: Robustez à variação no atrito

Devido ao aprendizado no algoritmo da plataforma anterior, uma das verificações realizadas foi a simulação de um sistema utilizando o mesmo algoritmo, porém com diferentes valores de atrito estático.

Para esta análise, foi feito uma configuração de teste com um freio magnético acoplado ao eixo da lavadora, exercendo um torque contrário ao sentido de rotação

do sistema. Ao aplicar uma tensão contínua de 0 a 12 Volts, o freio passava a exercer um torque proporcional à esta tensão.

A Figura 17 mostra o resultado normalizado de um dos testes utilizando o freio ligado e desligado, de modo a verificar a existência de uma possível influência do freio no cálculo da inércia do sistema.

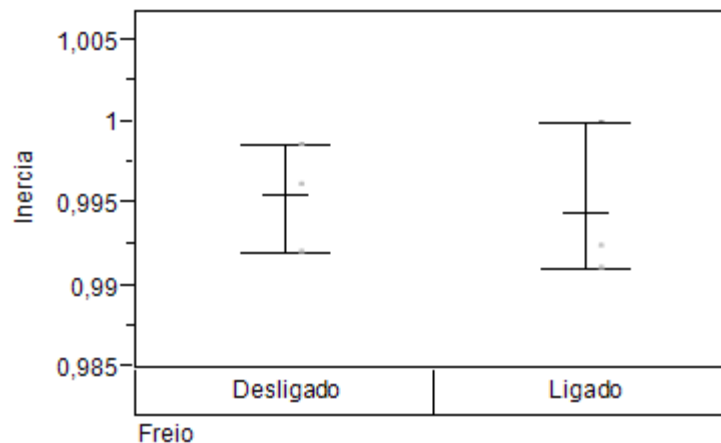


Figura 17 - Análise de robustez do sistema para atrito variado

Na teoria, o que se espera é que os coeficientes de atrito sejam eliminados, uma vez que esta é uma das principais vantagens do algoritmo proposto. Logo, os resultados estão coerentes com o que se esperava segundo a teoria do algoritmo.

4.3.2.3: Robustez à variação de placa para placa

Esta é outra análise que foi feita inspirada nos resultados do algoritmo anterior. Uma vez que não são usados sensores, e sim variáveis estimadas pela placa de controle, é possível que neste caso também haja uma grande variação no cálculo feito pela placa.. Porém, se houverem variações, espera-se que estas sejam muito inferiores às obtidas anteriormente, uma vez que, com o avanço da tecnologia, a estimação das variáveis ficou mais estável e precisa.

A Figura 18 mostra a análise normalizada da inércia calculada ao utilizar duas diferentes placas e duas diferentes quantidades de carga.

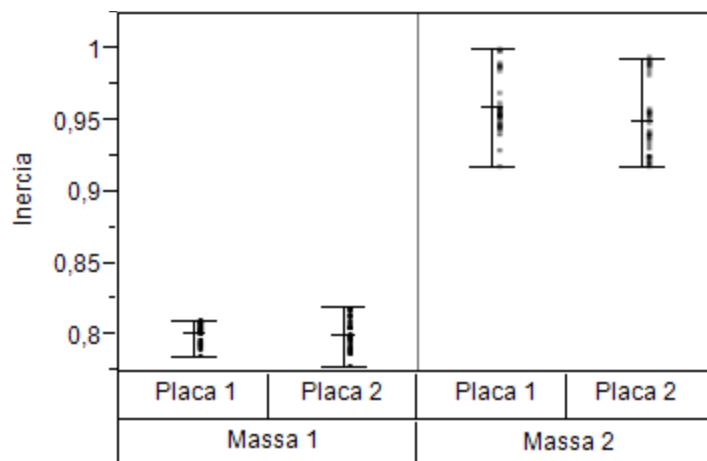


Figura 18 - Análise de variação de placa para placa com diferentes massas

É possível perceber que a inércia calculada utilizando as duas placas está equivalente, com uma diferença que pode ser considerada aleatória, devido ao fato de que há outros fatores confundidos nesta análise, que visa apenas mostrar a variação entre placas. Resumindo, não há *offset* considerável na média entre cada placa, e o desvio padrão em cada caso deve ser atribuído não só à placa, mas à diversos outros fatores que estavam sendo estudados nestes testes.

4.3.2.4: Erro no cálculo do torque

Outro fator a ser estudado é o erro na estimação do torque na placa. É importante salientar que não há nenhum torquímetro embarcado, ou qualquer outro sensor/instrumento que possa ser usado para medir torque, logo, o torque estimado é calculado com base em variáveis que o software lê diretamente do motor. Neste caso, o próprio motor se torna o sensor do sistema.

Porém, para o algoritmo apresentado, não há preocupação no cálculo do torque, uma vez que a equação da inércia calcula a diferença entre dois valores de torque, eliminando qualquer chance de *offset*.

4.3.2.5: Cargas desbalanceadas

Outro fator que pode influenciar no cálculo da inércia do sistema são as cargas desbalanceadas. O estudo de sua dinâmica será feito mais a frente, o que interessa agora é apenas sua influência no algoritmo.

A Figura 19 mostra a análise normalizada da inércia calculada ao utilizar cargas balanceadas e desbalanceadas com dois diferentes níveis de carga.

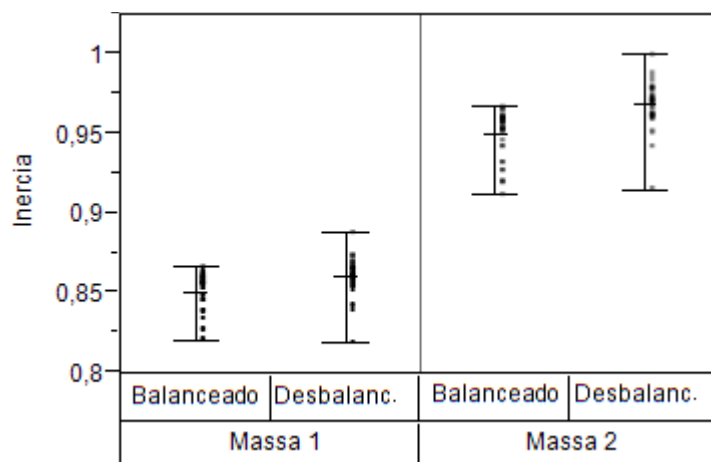


Figura 19 - Comparação de cargas balanceadas e desbalanceadas

Com o arranjo desbalanceado, a média do cálculo continua a mesma, porém o desvio padrão aumenta ligeiramente, devido provavelmente à uma maior vibração do sistema.

Todas as análises apresentadas nesta seção podem não necessariamente influenciar e fazer parte de alguma compensação do algoritmo, porém esta etapa é de extrema importância para entender melhor a dinâmica do algoritmo e explorar possíveis pontos de melhoria.

4.3.3: O problema da disposição da carga no cesto

Com exceção da influência de cargas desbalanceadas, até agora só foi falado de problemas que o sistema poderia ter e suas influências no cálculo da inércia. Porém, existe um fator muito importante a ser considerado: a disposição da carga no cesto.

A inércia calculada no algoritmo consiste em dois termos distintos. A primeira é a inércia do cesto vazio, constante para cada máquina, podendo sofrer pequenas variações devido às tolerâncias da produção. O segundo termo é a inércia da carga, que não apenas está diretamente ligada à quantidade de roupa inserida na máquina, mas também ao jeito que esta roupa é inserida, isto é, a forma geométrica assumida pelas cargas dentro do cesto.

O momento de inércia da carga no interior do cesto pode ser normalmente aproximado por um cilindro oco, descrito conforme o esquema da Figura 20.

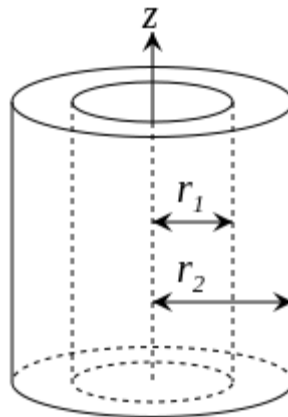


Figura 20 - Exemplo esquemático da carga no interior do cesto [7]

O momento de inércia deste sistema de massa m em torno do eixo Z pode ser definido por:

$$I = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2)$$

Logo, para uma mesma massa, conforme varia-se o raio interno, também ocorre variação no momento de inércia do sistema. Um estudo foi feito com determinadas quantidades de carga e o máximo raio interno que cada uma destas quantidades poderiam atingir. O resultado pode ser visto na Figura 21.

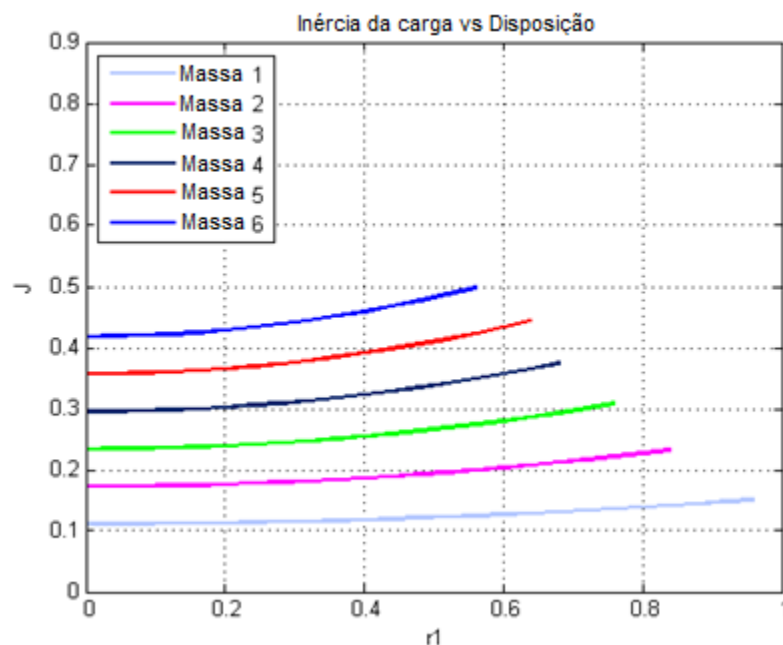


Figura 21 - Análise da inércia para diferentes disposições de carga

É possível observar que diferentes massas podem assumir a mesma inércia dentro do cesto. Embora não pareça, o efeito da disposição da carga no cesto pode diminuir drasticamente o número de classificações (quantidade de carga) que o algoritmo pode atribuir, tornando ainda mais necessária a compensação deste algoritmo.

Até o momento, não foi encontrada nenhuma solução que resolva completamente este problema, porém já existem alguns possíveis algoritmos candidatos que podem ser usados em complemento com o apresentado para minimizar o efeito da variação do raio interno.

4.3.4: Implementação em software embarcado

A implementação do algoritmo em software embarcado exigiu um certo tempo de estudo do sistema e arquitetura utilizada pela empresa, garantindo a criação de um código nos padrões exigidos, pronto para ser implementado, caso haja necessidade.

Para desenvolvimento dos códigos, a Whirlpool utiliza um padrão de arquitetura, onde, resumidamente, o sistema se baseia em módulos, visando o reaproveitamento de código de uma plataforma para outra. Isso facilita muito a implementação e testes em novas plataformas, uma vez que boa parte do código já encontra-se pronto, necessitando apenas de alguns ajustes.

O software usado para criar e editar os códigos foi o Eclipse, com projetos para a linguagem C. A Whirlpool já possui padrões prontos para seus tipos de código, tornando a adequação aos padrões de sua arquitetura mais fácil. Uma vez compilados os códigos, deve-se criar um espaço de trabalho em um segundo software para realizar a gravação da nova versão para a placa.

Toda a base de códigos fica em um servidor, onde cada desenvolvedor pode trabalhar na sua própria versão, efetuar mudanças, novos testes, etc., e cada uma destas mudanças fica disponível para que todos que possuem acesso ao sistema possam avaliar e testar.

A interface gráfica para comunicação PC/Placa de controle é feita com o auxílio de softwares desenvolvidos na própria Whirlpool.

Em um primeiro momento, os dados eram gravados em uma tabela, e então posteriormente, realizava-se uma análise off-line dos dados coletados. Com o conceito bem estruturado e um primeiro design de curva em mente, teve-se início a parte da programação embarcada.

O código foi programado para ser acionado ao apertar em um botão de uma das interfaces gráficas de comunicação entre a placa de o computador. Ao ser acionado, um perfil parecido com o apresentado no Capítulo 3 é executado, gerando como resultado, a quantidade de massa estimada dentro do cesto.

Devido ao fato de o design ainda não estar finalizado, o código foi feito de forma modular, onde é possível facilmente ajustar parâmetros-chave do perfil de curva.

4.3.5: Validação da solução

Uma vez implementado o software no sistema embarcado, é necessário que o mesmo seja validado. Esta validação consiste na comparação do método de cálculo online com o realizado off-line, garantindo que as análises feitas anteriormente estejam de acordo com as respostas do sistema em tempo real.

A validação do algoritmo implementado em software embarcado também servirá como garantia que todas as próximas análises possam ser feitas diretamente da saída do sistema, sem necessidade de pós-processamento de dados.

A Figura 22 mostra o valor normalizado da inércia calculada pelo algoritmo com processamento online e off-line, para dois níveis de carga. Os erros entre o processamento online e off-line estão retratados na Figura 23.

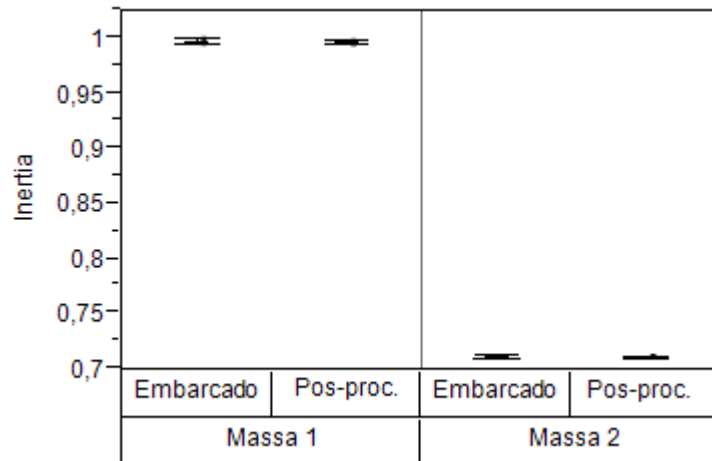


Figura 22 - Comparação Software embarcado e pós-processamento

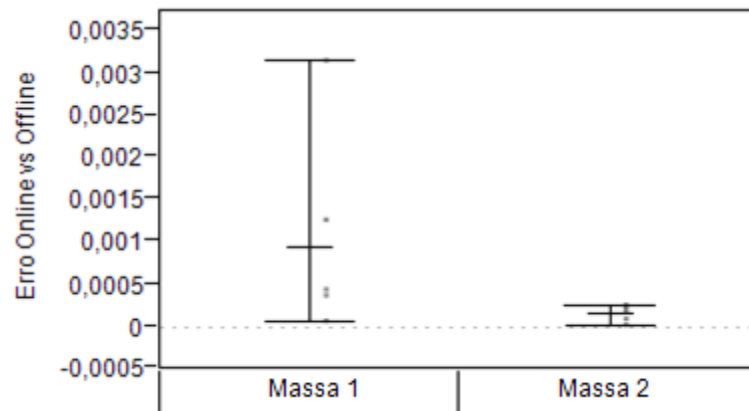


Figura 23 - Erro entre resultado fornecido pelo software embarcado e pós-processamento

Devido ao baixo erro, pode-se dizer que o algoritmo implementado no sistema embarcado está de acordo com o esperado, isto é, tem a mesma resposta do script desenvolvido no Matlab que processava a base de dados.

4.3.6: Próximos passos

Por ser uma plataforma ainda em fase de protótipo, mudanças podem acontecer (por exemplo, mudança no tamanho do cesto), portanto não pode-se afirmar que o algoritmo está perfeitamente validado. Ainda assim, devido ao fato do código já estar nos padrões da empresa, sua portabilidade para uma próxima geração de placa e versão da plataforma poderá ser feita sem dificuldades.

Além disso, conforme a evolução do produto, novos desafios podem chegar, necessitando de outras análises do algoritmo diferentes das apresentadas neste trabalho.

Outro ponto a ser testado é um sistema para minimizar o efeito de diferentes cargas no sistema, conforme explicado na seção 4.3.3. Esta atividade está prevista para ser realizada durante os próximos meses.

4.3.7: Resultados obtidos

O sistema atual, já implementado no software embarcado, foi testado para 5 diferentes níveis de carga, de duas formas diferentes: O primeiro com as cargas totalmente distribuídas e o segundo com diferentes distribuições, de modo a verificar a robustez do sistema atual frente a este problema.

A Figura 24 mostra o sistema com distribuição do tipo anel, isto é, com as totalmente próximas da parede do cesto, gerando valores de inércia maiores do que o comum.

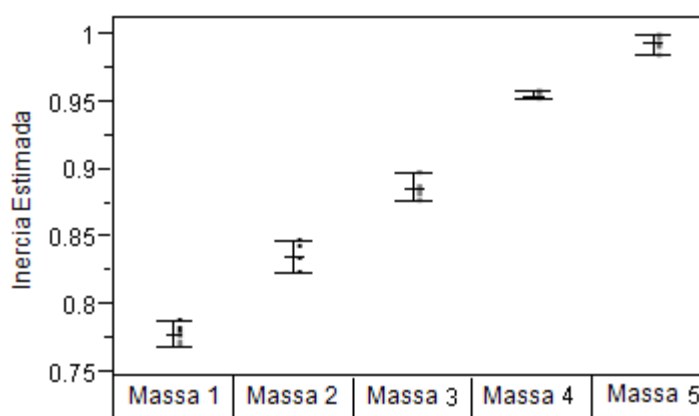


Figura 24 - Resultado do sistema implementado com 5 diferentes níveis de carga arranjadas em formato anelar.

Neste caso, o sistema apresenta uma boa discriminação entre os níveis de carga propostos. O outro extremo é o arranjo de carga no formato *dump*, onde grande parte das cargas localizam-se no centro do cesto, proporcionando uma inércia menor do que quando as cargas estão alojadas nos cantos do cesto. A Figura 25 mostra os resultados obtidos de inércia com a carga arranjada no formato *dump* para cinco diferentes níveis de massa.

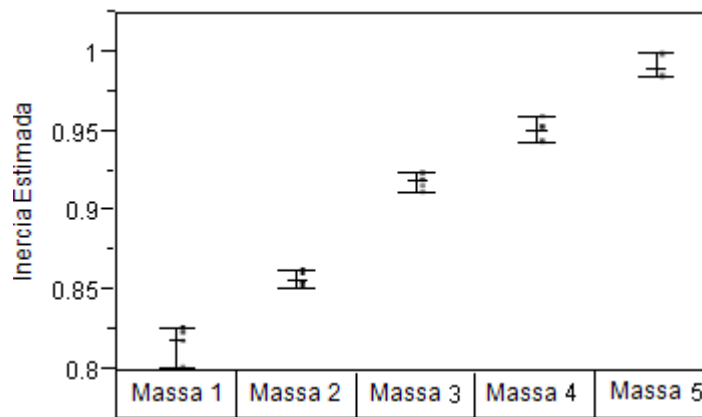


Figura 25 - Resultado do sistema implementado com 5 diferentes cargas arranjadas em formato dump

A junção destes dois gráficos resulta no conjunto de dados que o sistema pode estimar, considerando o maior e menor raio interno possível. Estes resultados ilustram o que foi apresentado no Capítulo 4 como o problema da disposição da carga no cesto. A junção das duas figuras pode ser vista na Figura 26.

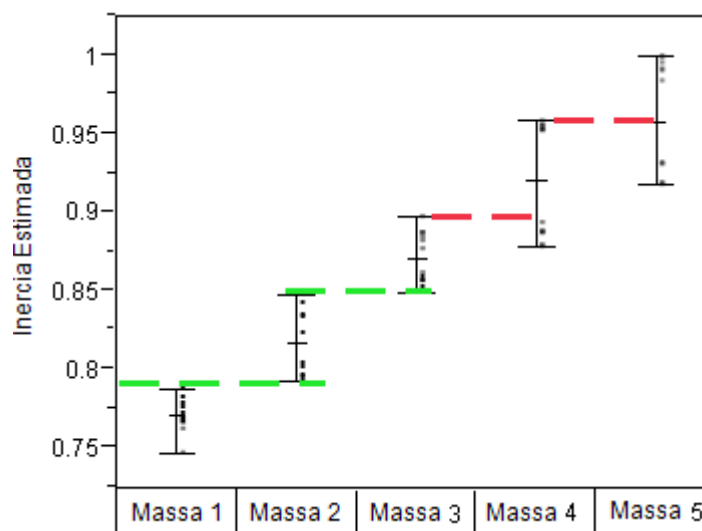


Figura 26 - Estimação de massa com cargas arranjadas de diferentes formas

As linhas tracejadas em vermelho representam pontos onde houve confusão por parte do algoritmo, no qual diferentes níveis de carga ficam sobrepostos. Vale ressaltar que, conforme apresentado no Capítulo 4, este comportamento é esperado pelo sistema.

Métodos de compensação deste problema serão estudados, e, no caso destes problemas persistirem, é possível reduzir o número de classificações total do sistema.

Capítulo 5: Algoritmo de detecção de tipo de carga e algoritmo de detecção de desbalanceamento

Este capítulo apresentará algumas atividades extras desenvolvidas para dois outros projetos. O primeiro se aplica inicialmente à Plataforma 1, que trata-se do algoritmo de detecção do tipo de carga, e funciona de forma complementar ao algoritmo de estimação de carga. O segundo se aplica a Plataforma 2, onde ocorre a detecção de desbalanceamento na máquina.

É comum na Whirlpool a participação simultânea em diversos projetos, sendo possível liderar projetos e participar de outros. No caso deste trabalho, pode-se dizer que o algoritmo de estimação de carga foi o projeto principal, e os algoritmos descritos neste capítulo são projetos de outros membros da equipe. Embora a participação e tempo gasto nestas atividades tenha sido bem menores em relação às atividades descritas no Capítulo 4, os trabalhos desenvolvidos nesta seção não foram simplesmente operacionais, isto é, possuíam um certo nível de complexidade.

5.1: Algoritmo de detecção de tipo de carga

5.1.1: Desafio proposto

Conforme citado anteriormente, este algoritmo visa distinguir cargas com alta e baixa absorção, e funciona de forma complementar ao algoritmo de estimação de carga, tendo semelhante importância para o consumidor, uma vez que é possível definir automaticamente o melhor ciclo de lavagem para cada tipo de carga.

Em um ciclo normal, este algoritmo é executado logo após o algoritmo de estimação de carga, onde alguns cálculos de variáveis são feitos com base na quantidade de água que foi utilizada. É importante ressaltar que nesta plataforma a água não precisa ser necessariamente jogada diretamente sobre as roupas, mas sim passar inicialmente pelo recipiente de sabão ou amaciante, por exemplo, garantindo que estes insumos sejam diluídos antes de entrarem em contato com a roupa. A água que passa por estes recipientes vai para uma seção abaixo do cesto, onde há um sensor de pressão que determina o nível da água. Uma bomba de

recirculação é responsável por mandar esta água do fundo do cesto para sua parte superior, tornando então possível o contato com a carga.

O desafio apresentado neste algoritmo se insere no contexto de análise de variação entre máquinas e entre placas, e consiste na verificação da robustez do sistema para grandes variações no sensor de pressão, uma vez que o sensor utilizado é de baixo custo, e é previsto em sua especificação um *offset* consideravelmente alto para a quantidade de água que é inserida nesta fase, porém, irrelevante para a fase de lavagem. No caso, é mais um algoritmo que é implementado sem a intenção de adicionar custos ao produto, uma vez que o sensor de pressão para detectar o nível de água já encontra-se presente e é necessário para o ciclo de lavagem da máquina. A Figura 27 é a especificação do sensor fornecida pelo fabricante. Já a Figura 28 mostra o sensor de pressão, que localiza-se na própria placa de controle, e é ligado ao fundo da máquina por meio de uma mangueira.

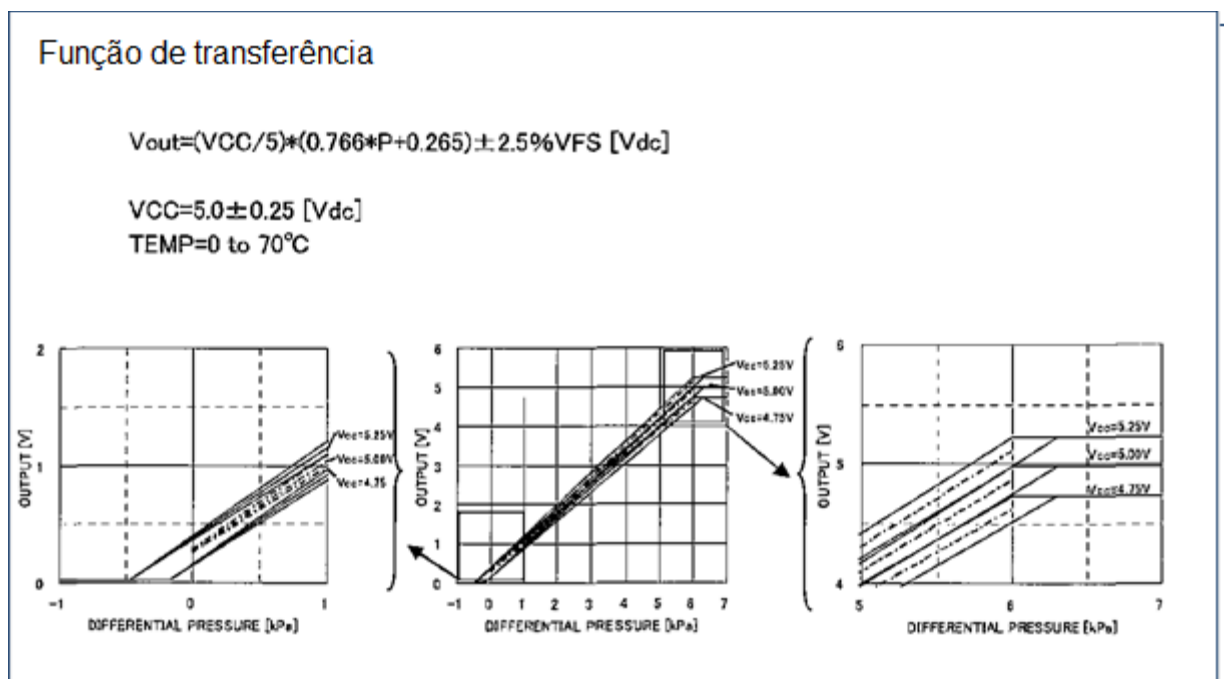


Figura 27 - Especificação do Sensor de Pressão

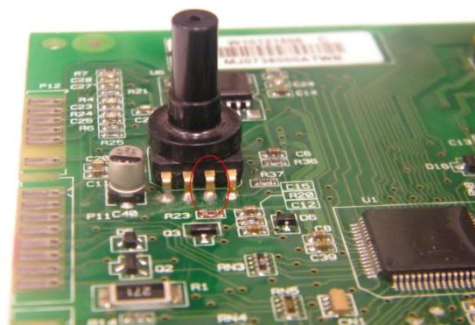


Figura 28 - Sensor de pressão na placa de controle

Várias simulações para diferentes casos de *offset* foram feitas, porém todas de forma virtual. Seus resultados apresentaram-se satisfatórios e comprovaram a robustez do algoritmo, porém era necessário validar isso com uma análise de *offset* real.

A placa de controle que estava sendo testada no laboratório em Joinville acusava um sensor sem *offset*, que é o caso ideal. Para simular uma variação na leitura do sensor, foi necessária uma análise detalhada no circuito da placa, onde foi necessária a inclusão de alguns componentes e pequenas alterações em seu circuito impresso.

5.1.2: Resultados obtidos

Ao modificar a placa de controle, removendo algumas trilhas e adicionando determinados componentes, o resultado esperado era um *offset* no sensor do nível de água, para validar os resultados entre um sensor simulado e este “novo” sensor.

A Figura 29 mostra o campo da interface do usuário onde monitora-se o nível atual de água no cesto, ao ligar a máquina, que estava vazia.

Status Item	Data
Status do controle	diag / ps control
Nível de água	5.13
Temp.da água	78.98
Estado do motor	idle
Motor RPM	0

Figura 29 - Interface do usuário enfatizando alteração no nível de água

É possível observar que as mudanças resultaram no efeito esperado, fazendo com que o sensor detectasse propositalmente uma quantidade de cinco milímetros de água, embora não houvesse água dentro da máquina.

A Figura 30 mostra a comparação entre os dados de simulação e os testes que foram executados com o sensor contendo um *offset* real, utilizando dois tipos de tecido.

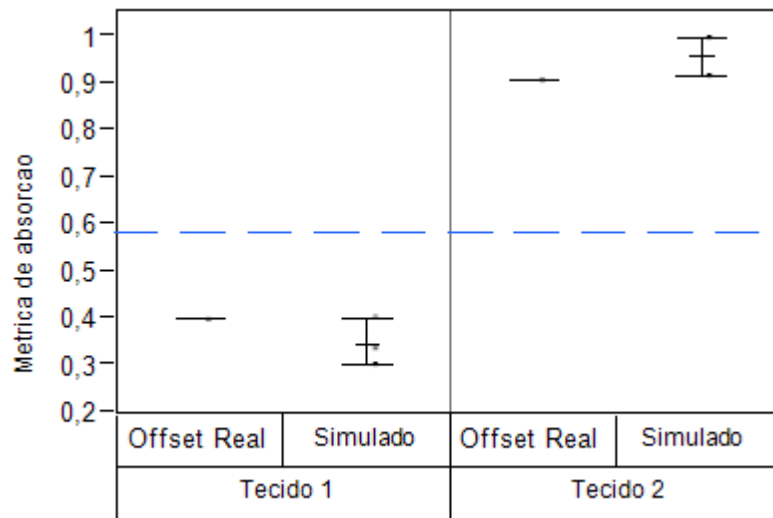


Figura 30 - Validação das análises de simulação de offset no sensor de pressão

A linha pontilhada na figura representa o limiar de detecção que distingue a classificação dos dois tipos de tecido. Além de mostrar que o algoritmo proposto era robusto à esta variação, foi possível validar os dados simulados, por estarem de acordo com os dados de um *offset* real.

Esta validação foi de grande importância, devido ao fato de que foram rodadas pelo menos 5 diferentes simulações de *offset*. A alternativa, caso as simulações não funcionassem, era encontrar sensores com *offset* compatível aos simulados, ou montar cinco diferentes circuitos na placa para realizar tal estudo.

5.2: Algoritmo de detecção de desbalanceamento

5.2.1: Desafio proposto

O consumidor que lê o manual de instruções de sua máquina de lavar sabe que uma das principais instruções ao inserir as roupas na máquina é garantir que estas estejam distribuídas de forma uniforme, isto é, que o carregamento esteja balanceado.

O não cumprimento deste procedimento pode causar um certo desconforto para o consumidor, uma vez que, se na etapa de centrifugação ainda houver uma distribuição desbalanceada de carga, podem haver sérias consequências para o sistema, desde casos mais simples, como aumento no ruído, até casos mais graves, como o *walking mode*, isto é, quando o cesto bate em certa direção que desloca a própria máquina, parecendo que a mesma está “caminhando”. Além de ser uma experiência desagradável, pode causar danos ao produto, às roupas, e até mesmo causar lesões ao consumidor, caso este esteja próximo da máquina.

Nas máquinas de eixo horizontal (ou de carregamento frontal) é mais fácil de garantir que não haja desbalanceamento, uma vez que, devido à ação da gravidade, torna-se mais fácil a reorganização das roupas dentro do cesto..

Para as máquinas de eixo vertical esta compensação é mais complicada, sendo necessários algoritmos robustos capazes de identificar esta condição de desbalanceamento ainda em baixas velocidades, evitando potenciais danos que podem ser causados por um sistema desbalanceado combinado com altas velocidades de rotação no momento de centrifugação.

A implementação do algoritmo de desbalanceamento na Plataforma 2 é outro desafio deste trabalho. Assim como o algoritmo de estimação de carga, haviam algumas implementações em plataformas mais antigas, porém, a tecnologia disponibilizada pela nova plataforma possibilita explorar novas alternativas.

Primeiramente, uma série de testes foram executados, com diversas condições de cargas balanceadas e desbalanceadas. Em seguida, teve início a fase de testes e avaliação de algoritmos.

Um ponto importante a ressaltar na implementação deste algoritmo é a facilidade da análise, uma vez que o perfil de teste de desbalanceamento é o semelhante ao perfil de centrifugação da máquina, dispensando a necessidade de variar o plano do teste. Em contrapartida, isto pode ser visto também como uma restrição, pois é um grau de liberdade a menos para se variar com intuito de melhorar o desempenho do algoritmo.

A partir de duas especificações fornecidas, foi criado uma rotina de processamento off-line para cada uma, onde todos os arquivos eram processados e a métrica proposta era calculada, com o objetivo de encontrar a solução que melhor

separasse cargas medições com carga balanceada de medições com carga desbalanceadas.

O primeiro algoritmo avaliado corresponde à solução já existente, utilizada em máquinas mais antigas. Certas condições destes indicadores tornam possível detectar se o sistema está desbalanceado ou não.

O segundo algoritmo avaliado é um conceito novo, ainda não utilizado atualmente. Sua implementação não pode ser testada anteriormente, uma vez que depende de variáveis que apenas as placas mais novas são capazes de disponibilizar.

O que se espera como resultado deste trabalho é retornar o algoritmo com a melhor discriminação entre cargas balanceadas e desbalanceadas. Para isso, várias análises tiveram que ser feitas, mudando diversos parâmetros do algoritmo.

5.2.2: Resultados obtidos

Após traduzir as especificações fornecidas em algoritmos para detecção de desbalanceamento, foram obtidas as métricas propostas. O principal objetivo era identificar qual algoritmo e sua respectiva configuração proporciona maior diferença na métrica de saída entre cargas balanceadas e desbalanceadas.

Os primeiros resultados são referentes a um algoritmo novo, onde sua ideia base foi desenvolvida em Joinville. Neste caso, uma determinada análise foi feita, onde foi possível variar o tamanho da janela de tempo que o algoritmo utilizava para calcular certo valor, onde a métrica de saída do algoritmo era o máximo valor obtido e a velocidade que este valor foi detectado. É importante monitorar a velocidade que o algoritmo identifica o valor máximo da métrica, isto é, a velocidade em que o sistema se encontrava quando conseguiu detectar o desbalanceamento. A ideia de monitorar este valor é para garantir que o problema seja identificado ainda em baixas velocidades, evitando graves consequências que um sistema desbalanceado pode causar.

A Figura 31 mostra o resultado do primeiro algoritmo para diferentes janelas de tempo, comparando a métrica de desbalanceamento proposta para o sistema balanceado e desbalanceado.

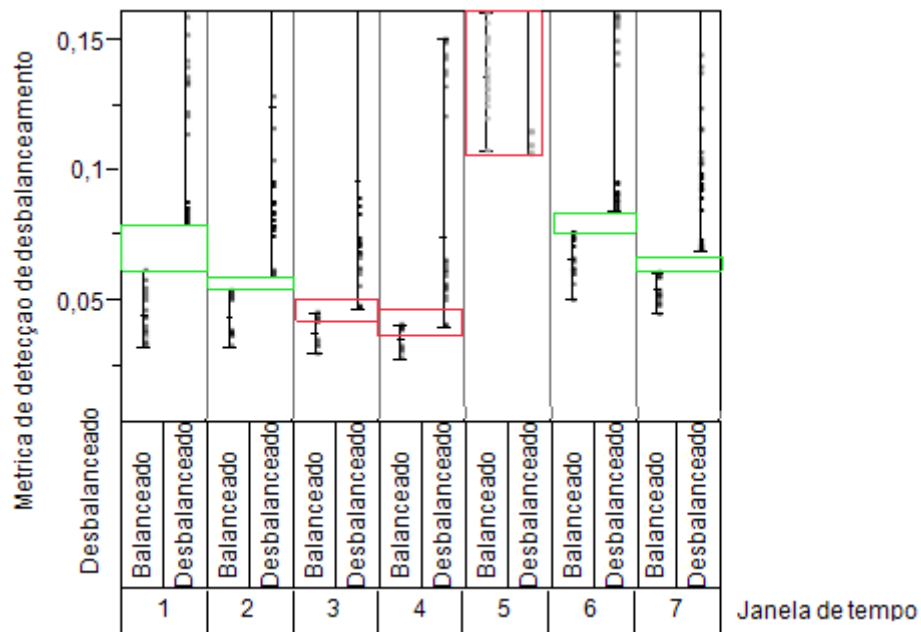


Figura 31 - Comparação de diferentes janelas de tempo para um algoritmo de detecção de desbalanceamento

É possível observar que a saída do algoritmo pode variar drasticamente, dependendo da janela de tempo escolhida. Em um primeiro momento, a janela identificada na figura como Janela 1 apresentou bons resultados, com boa discriminação entre carga balanceada e desbalanceada. Neste caso, é possível definir um limiar no espaço vazio entre os dois conjuntos de valores, e, uma vez que a métrica calculada ultrapasse este limiar, considera-se então que existe carga desbalanceada na máquina.

Embora não seja possível visualizar na figura acima, o sistema foi capaz de detectar o desbalanceamento em velocidades consideravelmente baixas, evitando possíveis consequências mais graves.

Nenhum algoritmo de otimização para cálculo da melhor janela de tempo foi executado, principalmente devido ao fato de que os resultados obtidos utilizando a Janela 1 foram satisfatórios. Porém, esta atividade não está descartada como uma das atividades futuras relacionadas a este algoritmo.

O segundo algoritmo proposto baseia-se simplesmente na adaptação de um algoritmo já existente em plataformas mais antigas (semelhantes à Plataforma 1, citada no algoritmo de estimação de carga), onde certa métrica é calculada em todas as amostras e o valor máximo dentre estas amostras é o resultado do algoritmo. O

objetivo também é encontrar um limiar que descreva se o sistema está desbalanceado.

A Figura 32 detalha o resultado obtido ao implementar o segundo algoritmo proposto na base de dados geradas com testes utilizando cargas balanceadas e desbalanceadas.

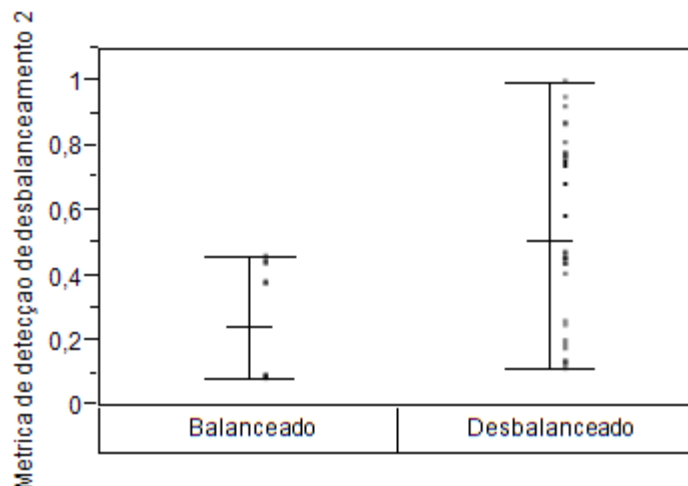


Figura 32 - Cálculo do segundo algoritmo de detecção de desbalanceamento

Neste caso, não há total garantia de que o algoritmo sempre acerte. A métrica resultante para casos balanceados tem comportamento semelhante a casos de pouca carga desbalanceada, tornando o algoritmo válido apenas para discriminar altos níveis de carga desbalanceada.

Uma das justificativas para isso é o próprio sistema de controle do motor, que nesta plataforma mais nova possui um sistema mais robusto de controle em malha fechada, o que prejudica o cálculo desta métrica.

Embora este segundo algoritmo não apresentou bons resultados como apresentava nas plataformas anteriores, o primeiro algoritmo mostrou-se capaz de garantir perfeita discriminação entre cargas balanceadas e desbalanceadas.

Assim como acontece com o algoritmo de estimação de carga, é necessária uma validação do algoritmo proposto como solução na versão final da plataforma em questão, pois, como já foi dito, esta plataforma encontra-se em fase de desenvolvimento, estando sujeita à diversas alterações mecânica, eletrônica e de software.

É importante salientar que os algoritmos aplicados a Plataforma 2 necessitam de novos testes, assim que a versão final do produto for definida, e que mais máquinas estejam à disposição, tornando possível a verificação de robustez do sistema ao testar a variação do resultado do algoritmo utilizando diferentes máquinas.

Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas

A inserção de novos algoritmos em uma máquina de lavar representa a evolução da tecnologia, que visa sempre melhorar e facilitar a vida das pessoas. A tendência é que as empresas invistam cada vez mais nesta área, pois é possível agregar valor ao produto final sem a necessidade de acréscimo de componentes.

Os algoritmos e desafios propostos ao longo deste trabalho tiveram resultados satisfatórios, tornando possível validar conceitos, confirmar a robustez de componentes utilizados e testar novos algoritmos.

Uma exceção foi o algoritmo de estimação de carga para a Plataforma 1, que não obteve sucesso comparado à implementação de seu sucessor devido às limitações do sistema.

Os resultados obtidos com o algoritmo de estimação de carga para a Plataforma 2 mostram que é possível estimar vários níveis de massa no cesto sem a necessidade de um sensor projetado especialmente para isso, apenas utilizando variáveis fornecidas pela interface de controle do motor.

A validação da variação do sensor foi um estudo útil não apenas para o algoritmo apresentado, mas para garantir que a aproximação feita para simular um sensor com *offset* é precisa e representa suas características.

Muitos testes com o algoritmo de detecção de desbalanceamento ainda precisam ser feitos, visando estudar melhor esta dinâmica ainda não muito modelada. De qualquer forma, já foi possível validar o potencial algoritmo que será implementado no sistema, uma vez que a discriminação entre cargas balanceadas e desbalanceadas foi satisfatória, restando apenas validá-lo utilizando a versão final do produto, que ainda encontra-se em desenvolvimento.

Baseado em todos estes resultados apresentados, é possível dizer que a meta geral deste trabalho foi atingida. Além disso, é importante salientar os aspectos pessoais envolvidos durante o desenvolvimento do presente trabalho, que proporcionou um grande desenvolvimento pessoal e profissional, tornando possível não só aplicar todo o conhecimento adquirido ao longo da graduação, mas também

no que diz respeito ao relacionamento interpessoal e convivência em um ambiente corporativo.

Conforme explicado anteriormente, há de se considerar uma carga de trabalho futuro nos algoritmos aplicados à Plataforma 2, uma vez que esta ainda encontra-se em fase de protótipo de desenvolvimento e sua versão final pode ter algumas diferenças da versão utilizada neste trabalho. Além disso, existem projetos de melhorias destes algoritmos, visando uma estimação mais rápida e precisa da massa do sistema, bem como de uma detecção de desbalanceamento em velocidades ainda menores.

Bibliografia:

- [1] APPLIANCE MARKET RESEARH REPORT. "U.S. Appliance Industry: Market Value, Life Expectancy & Replacement Picture 2011". UBM Canon, jun. 2011.
- [2] CASAGRANDE, S. "Washing machine with improved sensor for load weight", disponível em <http://www.google.com/patents/EP1988206A1?cl=en>. Acessado em Janeiro de 2013.
- [3] "Consumer Reports Online". Disponível em <http://www.consumerreports.org/cro/index.htm>. Acessado em Janeiro de 2013
- [4] "Controle Estatístico do processo". Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/content/2-gr%C3%A1ficos-ou-cartas-de-controle>. Acessado em Fevereiro de 2013
- [5] "Design of Experiment (DOE)". Disponível em <http://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/>, Acessado em Fevereiro de 2013.
- [6] HILD, C., SANDERS, D., ROSS, B.; Quality Engineering 12(1) , 1999-2000
- [7] "List of moments of inertia". Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_moments_of_inertia. Acessado em Janeiro de 2013.
- [8] Massachusetts Institute of Technology – "Lecture 2 – Solving the Equation of Motion". Disponível em <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-004-systems-modeling-and-control-ii-fall-2007/lecture-notes/lecture02.pdf>. Acessado em Setembro de 2012
- [9] RODRIGUES, Marcus Vinicius. Ações para a qualidade: GEIQ, gestão integrada para a qualidade : padrão seis sigma, classe mundial. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2004.
- [10] SANDERS, D., ROSS, B. and COLEMAN J., (1998). The Process Map.
- [11] "Whirlpool Latin America". Disponível em <http://www.whirlpool.com.br/>, Acessado em Janeiro de 2013.